

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta bezpečnostního inženýrství**

**Katedra požární ochrany**

## **Modelování požáru v silničním tunelu**

**Student: Bc. Břeská Pavla**

**Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Kučera, PhD.**

**Studijní obor: Technika požární ochrany a bezpečnost průmyslu**

**Datum zadání diplomové práce: listopad 2009**

**Termín odevzdání diplomové práce: 30. 4. 2010**

*„Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně.“*

V Ostravě 30. 4. 2010

Bc. Břeská Pavla

## ANOTACE

BŘESKÁ, Pavla. *Modelování požáru v silničním tunelu*. Ostrava, 2010. 48 s. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství.

**Klíčová slova:** silniční tunel, požární zkouška, požární scénář, modelování požáru

Diplomová práce se zabývá problematikou silničních tunelů a matematického modelování požáru v tunelu. Jednotlivé kapitoly popisují základní charakteristiky silničních tunelů, typy větrání, problematiku proudění vzduchu v tunelu, charakteristiku a konkrétní případy požárních zkoušek v ČR i ve světě. Závěrečná část je věnována matematickému modelování požáru. V rámci diplomové práce byly modelovány vytvořené požární scénáře využitím programu PyroSim a bylo sledováno, které faktory ovlivňují šíření kouře v tunelu.

## ANNOTATION

BŘESKÁ, Pavla. *Modelling of a road tunnel fire*. Ostrava, 2010. 48 p. VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of safety engineering.

**Key words:** road tunnel, fire test, fire scenario, modelling of fires

This thesis deals with the issue of road tunnels and mathematical modeling of fire in the tunnel. Individual chapters describe the basic characteristics of road tunnels, ventilation types, issues of airflow in the tunnel, and the characteristics of specific cases of fire tests. The last chapter describe theory of mathematical modeling. Several fire scenarios were modelled using the program PyroSim and the work examines which factors are influencing the movement of the smoke in the tunnel.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>REŠERŠE .....</b>	<b>2</b>
<b>1 CHARAKTERISTIKA SILNIČNÍCH TUNELŮ .....</b>	<b>5</b>
1.1 DĚLENÍ SILNIČNÍCH TUNELŮ.....	5
1.1.1 Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení.....	6
<b>2 VĚTRÁNÍ TUNELŮ .....</b>	<b>9</b>
2.1 ÚČEL VĚTRÁNÍ .....	9
2.2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VĚTRÁNÍ TUNELŮ .....	9
2.3 PŘIROZENÉ VĚTRÁNÍ .....	10
2.4 NUCENÉ VĚTRÁNÍ.....	11
2.4.1 Podélné větrání .....	11
2.4.2 Polopříčné větrání .....	12
2.4.3 Příčné větrání .....	13
2.5 POŽÁR V TUNELU .....	14
2.5.1 Šíření kouře při požáru .....	15
2.6 VLIV VENTILACE NA MAXIMÁLNÍ RYCHLOST UVOLŇOVÁNÍ TEPLA.....	15
<b>3 POŽÁRNÍ ZKOUŠKY V SILNIČNÍCH TUNELECH.....</b>	<b>17</b>
3.1 ZÁKLADNÍ TYPY ZKOUŠEK .....	17
3.2 POČÍTAČOVÁ SIMULACE.....	18
3.3 KOMPLEXNÍ ZKOUŠKY FUNKČNOSTI PBZ A INTEGROVANÉHO ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU.....	18
3.4 ZKOUŠENÍ REÁLNÝM POŽÁREM .....	19
3.4.1 Zkouška požárem nízkého výkonu.....	19
3.4.2 Zkouška požárem středního výkonu .....	19
3.4.3 Zkouška požárem vysokého výkonu.....	19
3.5 POŽÁRNÍ ZKOUŠKY V TUNELECH V ČR .....	19
3.5.1 Požární zkoušky v tunelu Valík .....	19
3.5.2 Požární zkoušky v tunelu Mrázovka] .....	20
3.5.3 Požární zkoušky v tunelu Klimkovice.....	21
3.6 POŽÁRNÍ ZKOUŠKY VE SVĚTĚ .....	24
<b>4 MODELOVÁNÍ POŽÁRU .....</b>	<b>26</b>
4.1 DETERMINISTICKÉ MODEL Y .....	27
4.1.1 Zónové model y.....	27
4.1.2 Model y typu pole.....	28
4.2 APLIKACE CFD MODELŮ NA POŽÁRY V TUNELU .....	29
4.3 OVĚŘOVÁNÍ MATEMATICKÝCH MODELŮ .....	30

<b>5</b>	<b>MODEL POŽÁRU V TUNELU .....</b>	<b>31</b>
5.1	POPIS MODELU TUNELU .....	31
5.2	POPIS MODELU V PROGRAMU FDS (PYROŠIM).....	32
5.3	VÝSTUPY PROGRAMU FDS .....	33
5.3.1	<i>Roviny (slices)</i> .....	33
5.3.2	<i>Statistika</i> .....	33
5.3.3	<i>Zařízení (devices)</i> .....	33
5.4	POŽÁRNÍ SCÉNÁŘE .....	34
5.4.1	<i>Modelová situace 1</i> .....	34
5.4.2	<i>Modelová situace 2</i> .....	36
5.4.3	<i>Modelová situace 3</i> .....	39
5.4.4	<i>Modelová situace 4</i> .....	41
5.5	POZNATKY ZÍSKANÉ MODELOVÁNÍM.....	42
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>45</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>47</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>47</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>48</b>

# ÚVOD

Při realizaci významných dopravních staveb výrazně vzrostl v uplynulých deseti letech podíl silničních tunelů. Ty jsou dnes nezbytnou součástí silniční sítě umožňující průchod dopravní stavby členitým územím, urbanizovanou krajinou nebo mají za úkol minimalizovat její dopad na obyvatele a okolní přírodu. Nárůst silničních tunelů je zřejmý zejména ze skutečnosti, že do roku 1996 dosahovala jejich délka na silniční síti v České republice necelých 1000 m. V roce 2008 již, však celková délka dosáhla více než 11 km.

Podle údajů Ředitelství silnic a dálnic ČR dnes dosahuje celková délka tunelů v provozu 11,8 km, ve výstavbě je 11,5 km a v projektu dalších 9,4 km. V souvislosti s výstavbou tunelů se nabízí i problematika jejich bezpečnosti. Problematika požární bezpečnosti tunelů je v posledních letech často diskutovaným tématem.

Požáry v tunelech nejsou podle statistik tak časté jako na otevřených komunikacích, ale když už k požáru v tunelu dojde, má mnohem katastrofálnější následky. Při požáru nejsou ohroženi jen účastníci dopravní nehody, nýbrž i ostatní osoby nacházející se v tunelu. Mezi hlavní rizika patří zejména kouř a jeho šíření a dále také vysoká teplota. Tyto faktory mohou být ovlivněny správně zvolenou a fungující požární ventilací.

V Evropě se odborníci začali o bezpečnost tunelů zajímat bezprostředně po závažných požárech v letech 1999 – 2001. Jednalo se o požáry v tunelu Mt. Blanc (1999, 39 mrtvých), v rakouském tunelu Tauern (1999, 12 mrtvých), v tunelu St. Gotthard (2001, 11 mrtvých) aj. Na základě těchto skutečností byly zahájeny výzkumné projekty týkající se požární bezpečnosti tunelů. Z poznatků a zkoušek byly vytvořeny směrnice určující minimální požadavky na bezpečnost tunelů na pozemních komunikacích.

Dnes jsou na tunely kladeny vysoké bezpečnostní požadavky, které zahrnují i provádění požárních zkoušek před uvedením do provozu. Jedná se o zkoušky funkčnosti větracího systému, elektrické požární signalizace a dalšího technického vybavení. Poznatky ze zkoušek i z reálných požárů jsou využívány k dalšímu návrhu tunelového zabezpečení.

Nevýhodou požárních zkoušek je jejich nákladnost a také to, že nemohou být prováděny reálným požárem z důvodu poškození tunelového vybavení. Často je při požárních zkouškách ke tvorbě dýmu použita dýmovnice, kouř se tedy nechová stejně jako při reálném požáru.

Diplomová práce řeší problematiku větrání tunelů, požárních zkoušek a její stěžejní části je matematické modelování požáru, kdy je posuzováno, které faktory v největší míře ovlivňují šíření kouře při požáru v tunelu.

## REŠERŠE

Problematika bezpečnosti silničních tunelů je v poslední době velmi diskutovaným tématem. Mnoho odborníků publikuje své články v odborných časopisech, které se týkají tunelové problematiky. Existuje však velmi málo publikací, které by se obsáhle věnovaly tunelům a jejich požární bezpečnosti. Stěžejní literaturou pro tvorbu diplomové práce byla publikace:

**BEARD, Alan, CARVEL, Richard. *The handbook of tunnel fire safety*. 1st edition. London: Thomas Telford publishing, 2005. 514 s. ISBN 0 7277 3168 8.**

Tato publikace je velmi obsáhlou příručkou pro požární bezpečnost tunelů. Dělí se do pěti částí – Reálné požáry v tunelech, Prevence a ochrana, Dynamika požáru v tunelu, Požárně bezpečnostní management a lidské faktory a Záchranné postupy. Autoři jednotlivých kapitol jsou odborníci v oblasti požární ochrany z celého světa, kteří se specializují se na požární bezpečnost tunelů. Diplomant čerpal především z kapitol týkajících se větrání tunelů v části II – Prevence a ochrana a z části III – Dynamika požáru v tunelu, kdy se autoři zabývají přímo CFD modely požáru v tunelu.

Významným periodikem publikujícím odborné články z oblasti výzkumu, technologií a inovací v souvislosti s tunely je *Tunnelling and Underground Space Technology*, z kterého byl čerpán následující článek:

**HARTMAN, Piet; HUIJBEN, Hans. Tunnel ventilation and safety in escape routes. *Tunnelling and underground space technology*. May-July 2006, Volume 21, Issues 3-4, s. 293-294. ISSN 0886-7798.**

Článek se věnuje podélně větraným tunelům. Zejména je řešena otázka rozmístění ventilátoru v závislosti na délce tunelu, tlakové difference a bezpečná evakuace.

Velkým přínosem pro práci byly závěrečné zprávy o požárních zkouškách z příloh časopisu 112:

**KOLEKTIV AUTORŮ. Zkoušky koordinace požárně bezpečnostních zařízení a systému ventilace v tunelu Klimkovice. 112 : Příloha. roč. 2008, č. 12, 12 s.**

Článek je věnován podrobnému popisu požárních zkoušek v tunelu Klimkovice. Byly využity převážně informace týkající se parametrů tunelu a okolních podmínek požární zkoušky.

**KOLEKTIV AUTORŮ. Požární zkoušky v silničním tunelu Valík. 112 : Příloha. roč. 2007, č. 5, 12 s.**

Zpráva popisuje podrobný průběh požárních zkoušek v tunelu Valík. V rámci zkoušek bylo využito porovnání naměřených hodnot s výsledky matematických modelů požáru v tunelu, které byly provedeny s využitím programů FDS a jeho nástavbou PyroSim.

Legislativní a normativní předpisy týkající se tunelové problematiky:

- **Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/54/ES o minimálních bezpečnostních požadavcích na tunely transevropské silniční sítě**
  - platí pro tunely delší než 500 m, klade požadavky k zajištění minimální úrovně bezpečnosti uživatelů komunikací v tunelech transevropské silniční sítě prostřednictvím předcházení vzniku kritických událostí, které mohou ohrozit lidský život, životní prostředí a zařízení tunelu, a zajištění ochrany v případě nehod
- **Nařízení vlády č.264/2009 Sb., o bezpečnostních požadavcích na tunely pozemních komunikací**
  - zpracovává Směrnici EU 2004/54/ES a upravuje náležitosti bezpečnostní dokumentace tunelů delších než 500 m, bezpečnostní požadavky na tunel, vzor zprávy o mimořádných událostech v tunelu, vymezení činnosti pověřené osoby při koordinaci opatření k zajištění bezpečnosti provozu tunelu a požadavky na její odbornou kvalifikaci a praxi
- **ČSN 73 7507 Projektování tunelů pozemních komunikací (z roku 2006)**
  - kategorizace tunelů (podle délky a intenzity dopravy), navrhování a varianty tunelů, bezpečnostní stavební úpravy, technické vybavení tunelů, návrh stavby z hlediska požární bezpečnosti
- **TP 98: Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací**
  - požadavky technické a technologické vybavení tunelů pozemních komunikací a jejich bezpečnost
  - TP98/Z1 z roku 2008 (změna v začlenění do bezpečnostních kategorií aj.)
- **TP 154: Provoz, správa a údržba tunelů pozemních komunikací**
- **Zákon č. 111/1994 Sb., o silniční dopravě ve znění pozdějších předpisů**



- **Zákon č.183/2006 Sb., stavební zákon ve znění pozdějších předpisů**
- **Vyhláška č.146/2008 Sb., o rozsahu a obsahu projektové dokumentace dopravních staveb**

# 1 CHARAKTERISTIKA SILNIČNÍCH TUNELŮ

Tunel je liniová podzemní stavba, kterou vede pozemní komunikace (silnice, dálnice, místní komunikace) nebo železnice, lanovka apod., umožňující plynulou a bezpečnou jízdu podcházením horských masivů, vodních překážek, osídlených oblastí, kulturně, ekonomicky cenných území apod. [11]

Podle využití můžeme rozdělit tunely na tři typy:

- tunely na pozemních komunikacích
- tunely na železničních komunikacích
- tunely metra

Každý typ má své specifické charakteristiky, liší se technologickým vybavením a i příčiny požáru mohou být rozdílné.

Velký důraz je kladen zejména na bezpečnost silničních tunelů. Riziko je zde mnohem vyšší než na otevřených komunikacích, protože nejsou ohroženi jen účastníci dopravní nehody, ale požár v tunelu může působením kouře ohrozit životy všech ostatních osob, které se v tunelu nachází [2].

Hlavní stavební částí tunelu je tunelová trouba. Jedná se o část tunelu vymezenou tunelovými portály, kterou je vedena pozemní komunikace. Tunelový portál je část tunelu, která ohraničuje tunelovou troubu z vnější části a vytváří vjezdový či výjezdový (popř. kombinovaný) otvor. V případě jednosměrných tunelů, kde má každý jízdní směr svou tunelovou troubu, je jeho součástí tunelová propojka, která slouží jako částečně chráněná úniková cesta, jenž obě trouby spojuje ve vymezených vzdálenostech. Může plnit funkci záchranné cesty a bývá přetlakově větraná. Další součástí tunelu mohou být nouzové jízdní pruhy, které umožňují plné nebo částečné odstavení vozidel a jsou po celé jeho délce. Dále nouzové zálivy, tvořené rozšířením profilu tunelu po určitých vzdálenostech, sloužící zejména pro odstavení vozidel v poruchovém stavu a otáčecí zálivy pro nouzové otočení vozidel do protisměru.

## 1.1 Dělení silničních tunelů

Silniční tunely dělíme podle několika kritérií:

### **Příčné uspořádání**

Podle příčného uspořádání dělíme tunely na obousměrné, kde doprava probíhá v obou směrech v jedné tunelové troubě, a jednosměrné, kde má každý směr svou tunelovou troubu (především dálniční tunely).

## Délka tunelu

Délka tunelu je jednou z hlavních charakteristik silničních tunelů a má zásadní vliv na volbu ventilačního systému. Obecně platí, že čím je délka tunelu větší, tím jsou vyšší nároky na použité větrání. Podle délky rozdělujeme silniční tunely na [11]:

- Krátké (do 300 m)
- Střední (do 1000 m)
- Dlouhé (nad 1000 m)

## Ventilační systém

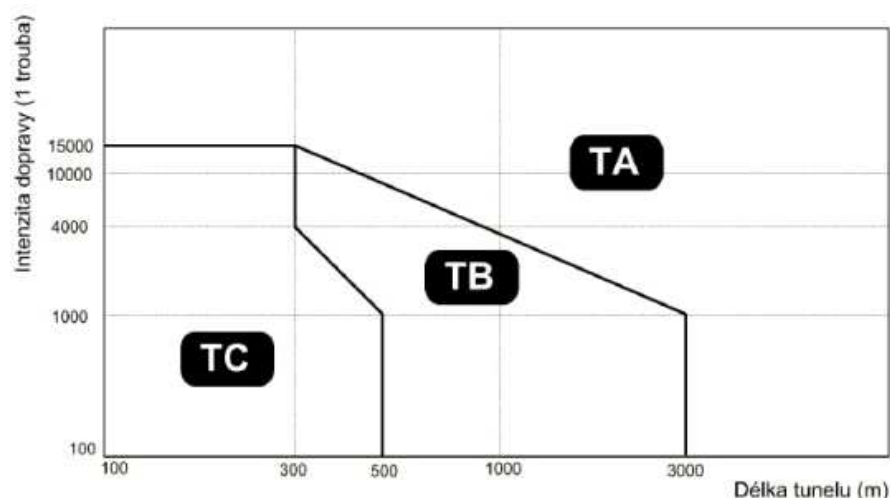
Správná volba ventilačního systému má zásadní vliv na bezpečnost tunelu. Při nesprávné volbě systému větrání může mít mimořádná událost katastrofální následky. Tunely dělíme na tunely s větráním přirozeným a větráním nuceným. K větrání je využito systému podélného, příčného nebo polopříčného, popř. jejich kombinace (např. kombinace podélného větrání s polopříčným). Systémy větrání jsou blíže popsány v samostatné kapitole.

### 1.1.1 Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení

Podle [15] se tunely dále dělí z hlediska bezpečnosti do tří bezpečnostních kategorií:

- kategorie TA
- kategorie TB
- kategorie TC

Tyto bezpečnostní kategorie jsou určeny ze závislosti intenzity dopravy na délce tunelu. Intenzita dopravy je dána ročním průměrem denní intenzity ekvivalentních vozidel<sup>1</sup> (RPDI)[15].



Obrázek 1: Dělení tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení

<sup>1</sup> Převodní koeficienty pro jednotlivé druhy vozidel [15]: osobní automobil – 1,0; motocykl – 0,5; nákladní automobil, autobus – 1,7; přívěsy a návěsové soupravy – 2,5

Osy grafu jsou v logaritmické měřítku. Rozsah intenzit je 0 – 100000 voz/den, délka tunelu od 100 – 10000 m. Pro rozsah intenzit 1000 – 4000 (15000) voz/den se korigují kategorie tunelu při dané délce v závislosti na intenzitě dopravy. Hraniční přímky v grafu vyjadřují nelineární závislost mocninné funkce se záporným koeficientem tvaru  $q = A \cdot l^{-B}$ , kde  $q$  je intenzita dopravy,  $l$  délka tunelu a koeficienty  $A$ ,  $B$  jsou regresní koeficienty mocninné řady. Pokud se předpokládá intenzita dopravy vyšší než 15000 voz/den jsou tunely zařazené do kategorie TA. [15]

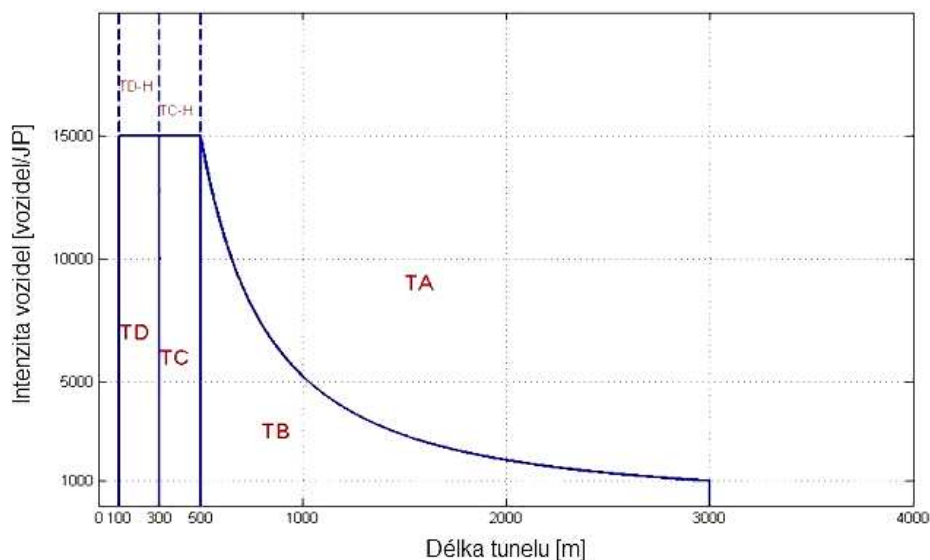
Pro intenzitu dopravy nižší než 1000 voz/den se tunely kategorizují pouze podle délky:

**Tabulka 1: Bezpečnostní kategorie pro tunely s intenzitou dopravy menší než 1000 voz/den**

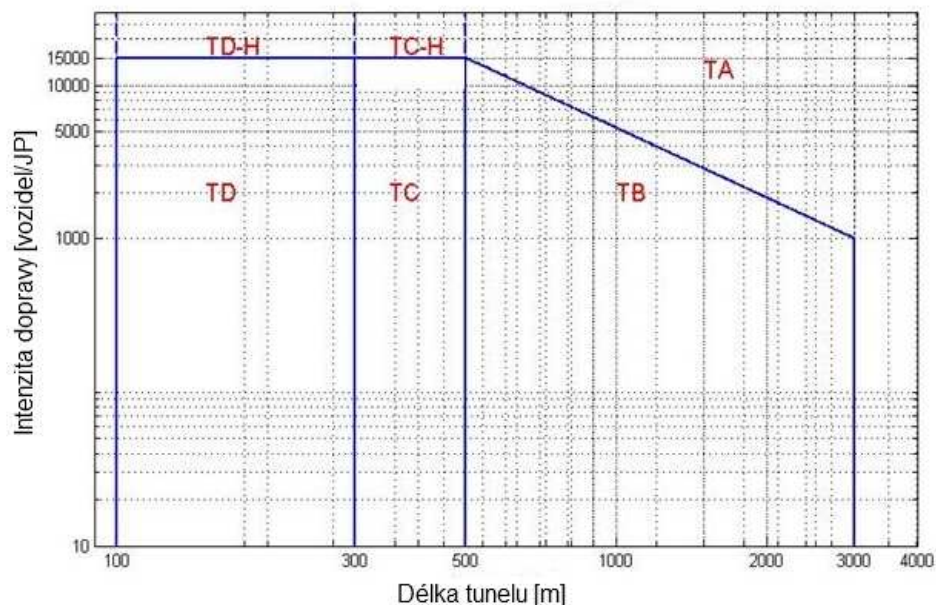
Kategorie	TC	TB	TA
Délka [m]	100–500	500–3000	3000–10000

Na základě začlenění do příslušné kategorie je tunel technologicky vybaven.

Ve změně TP98/Z1 z roku 2008 jsou tunely rozděleny do čtyř bezpečnostních kategorií TA, TB, TC a TD a do dvou podkategorií TC-H a TD-H podle následujících obrázků.



**Obrázek 2: Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (lineární měřítko)**



**Obrázek 3: Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (logaritmické měřítko)**

Pro intenzity dopravy nižší než 1000 voz/den a JP se kategorizují tunely pouze podle délky:

**Tabulka 2: Kategorizace tunelů pro intenzitu nižší než 1000 voz/den**

Kategorie	TD	TC	TB	TA
Délka [m]	100 – 300	300 – 500	500 – 3000	3000 – 10000

Pro rozsah intenzit RPD 1 000 – 15 000 voz/den na JP se koriguje kategorie tunelu při dané délce v závislosti na intenzitě dopravy. Pro intenzitu dopravy RPD vyšší než 15000 voz/den se tunely kategorizují opět pouze podle délky.

**Tabulka 3: Kategorizace tunelů pro intenzitu dopravy vyšší než 15000 voz/den**

Kategorie	TD-H	TC-H	TA
Délka [m]	100–300	300–500	500 – 10000

Grafy na *Obr.2* a *Obr.3* jsou platné pro tunelovou troubu s jedním nebo dvěma pruhy v dopravním pásu a příslušnou intenzitou dopravy. Tunel se třemi nebo více pruhy v jednom dopravním pásu je vždy navrhován v kategorii TA, resp. u krátkých tunelů v kategorii TD-H či TC-H. Dále se tunel zařazuje o kategorii výše v případě připojování nebo odbočování vozidel v tunelové troubě pokud RPD leží v tolerančním poli 15% od hraniční přímk. [15]

## 2 VĚTRÁNÍ TUNELŮ

Větrání silničních tunelů rozdělujeme do dvou základních rovin – větrání provozní a větrání havarijní (při požáru). Havarijní větrání se spouští při vzniku mimořádné události a jeho hlavním úkolem je odstranění nebo usměrnění kouře a horkých plynů od požáru tak, aby byl zajištěn bezpečný únik osob únikovými cestami a byl umožněn relativně bezpečný protipožární zásah.

### 2.1 Účel větrání

Větrání tunelu je velmi důležitou součástí projektové dokumentace. Účel větrání podle TP98 je následující [15]:

- Zabezpečení koncentrace škodlivin ve vzduchu v mezích nejvyšších přípustných koncentracích nejnebezpečnějších látek, se zřetelem na dobu pohybu osob v tunelu a ve smyslu hygienických předpisů
- Zajištění dobré viditelnosti pro průjezd vozidel při znečištění tunelového vzduchu emisemi výfuků vznětových motorů s ohledem na povolenou rychlost vozidel
- Snížení účinku kouře a tepla při požáru na osoby nacházející se v tunelu včetně složek integrovaného záchranného systému
- Řízení rozptylu škodlivých látek ve vzduchu způsobených exhalacemi vozidel do okolí tunelu, a tím snížení imisního zatížení okolí

### 2.2 Faktory ovlivňující větrání tunelů

Větrání tunelu, resp. proudění vzduchu v tunelu, je ovlivněno mnoha faktory. Prvním z nich je systém použitého větrání. Větrání silničních tunelů je realizováno přirozeně nebo nuceně. Nucené větrání rozdělujeme na příčné, polopříčné a podélné. V některých případech je použito kombinace uvedených systémů.

Výrazně ovlivnit proudění vzduchu v tunelu mohou atmosférické vlivy. Zahrnují zejména tlakový rozdíl mezi portály tunelu, okamžitý směr větru, kdy je na návětrné straně vytvářen přetlak, zatímco na opačné straně podtlak, teplotní rozdíl na portálech tunelu a teplotní rozdíl vně a uvnitř tunelové trouby.

Významný vliv na proudění vzduchu v tunelu má doprava. Zejména pístový efekt způsobený jedoucimi vozidly má pro proudění vzduchu zásadní význam. U jednosměrných tunelů, kdy je použito přirozeného větrání, je pístový efekt dominantním faktorem ovlivňujícím proudění vzduchu v tunelovém tubusu. Za zmínku stojí intenzita dopravy, která

může mít zásadní vliv zejména u městských tunelů, kde v dopravní špičce dochází ke zpomalení dopravy a k dopravním zácpám.

V neposlední řadě proudění vzduchu ovlivňuje stavební konstrukce tunelu a to zejména jeho délka, průřez, podélné uspořádání tunelu, vedení samotného tunelu z hlediska výškového a směrového (stoupání, poloměr zakřivení) a zdali se tunel větví nebo sbíhá.

## 2.3 Přirozené větrání

Přirozené větrání nevyžaduje žádné přídavné technické zařízení. Vzduch se obměňuje díky rozdílu tlaku a teploty mezi portály a prostřednictvím vozidel, které způsobují výměnu vzduchu tzv. pístovým efektem. Zásadní vliv na přirozené větrání mají klimatické podmínky na portálech tunelu, z nichž je nejdůležitější tlaková difference způsobená buď rozdílnou nadmořskou výškou, okolní teplotou nebo směrem převládajících větrů.

Při obousměrném provozu v tunelu vykonává sloupec vzduchu v tunelu kmitavé pohyby, které odrážejí fluktuace v hustotě a rychlosti provozu v každém směru. Tunelový vzduch se v oblasti portálů mění rychle, ale v centrální části může docházet k hromadění zplodin. Zplodiny se budou hromadit tím více, čím větší bude intenzita dopravy [15].

Při jednosměrném provozu se plně projeví pístový efekt. Přirozená ventilace může být tedy dostačující až pro tunely dlouhé do 0,5 km [7].



Obrázek 4: Přirozená ventilace

Při vzniku požáru se horké plyny a kouř šíří směrem ke stropu tunelu a vytvářejí souvislou vrstvu kouře šířící se oběma směry od požáru. Je sporné, jestli je tento přirozený jev schopný udržet nezakouřenou vrstvu ve spodní části tunelu dostatečnou pro bezpečný únik osob. Výška a velikost nezakouřené vrstvy zde závisí na mnoha faktorech (velikost požáru, rychlost rozvoje požáru, rozměry a sklon tunelu, mezní teploty, pohyb vzduchu způsobený přirozeným prouděním nebo pohybem vozidel). Znázornění průběhu zakouření v přirozeně větraném tunelu bylo modelováno a je blíže popsáno v závěru práce, viz kapitola 5.4.4.

Zejména u delších tunelů může být přirozené větrání nedostačující, a proto se často využívá přídavné havarijní ventilace, tzv. „*emergency ventilation*“, která se spouští pouze v případě vzniku požáru, popř. jiné neočekávané události v prostoru tunelu. Systém přídavné požární ventilace je využit například u dálničního tunelu Valík.

## 2.4 Nucené větrání

Nuceným větráním rozumíme větrání za použití přídavných zařízení ovlivňujících a podporujících proudění vzduchu v tunelu. Podle použitého větracího systému rozdělujeme nucené větrání na podélné, příčné a polopříčné. Pro dosažení optimálního účinku větracího systému se často používá jejich kombinace. Při volbě systému je nutné dbát na co nejlepší využití přirozeného větrání, ale zároveň musí být dodrženy požadavky na škodlivé imise v okolí tunelu a ochranu osob před požárem.

V následující tabulce je uveden rozsah použití ventilačních systémů.

Tabulka 4: Rozsah použití ventilačních systémů [15]

Rozsah použití ventilačních systémů		
	Délka tunelu [km]	
	Obousměrný provoz v jedné troubě	Jednosměrný provoz v jedné troubě
<b>Přirozená ventilace (+CO varovný systém)</b>	do 0,3	do 0,5
<b>Podélná ventilace</b>		
<i>proudové ventilátory</i>	do 2	do 3
<i>proudové ventilátory a odsávací komíny</i>	do 4	do 5
<b>Polopříčná ventilace</b>		
<i>reverzibilní</i>	od 0,5	od 2
<i>polopříčná-příčná</i>	od 1,8	
<b>Příčná ventilace</b>	od 2,5	od 4

### 2.4.1 Podélné větrání

Při podélném systému větrání je kouř vytlačován pomocí vzduchotechnických zařízení ve směru jízdy výjezdovým portálem ven. Vzhledem ke stavebním úpravám je tento typ větrání nejjednodušší. Podélná ventilace může být buď mezi oběma portály, mezi portálem a větrací šachtou nebo mezi dvěma větracími šachtami. Podélné větrání tunelové trouby se provádí pomocí:

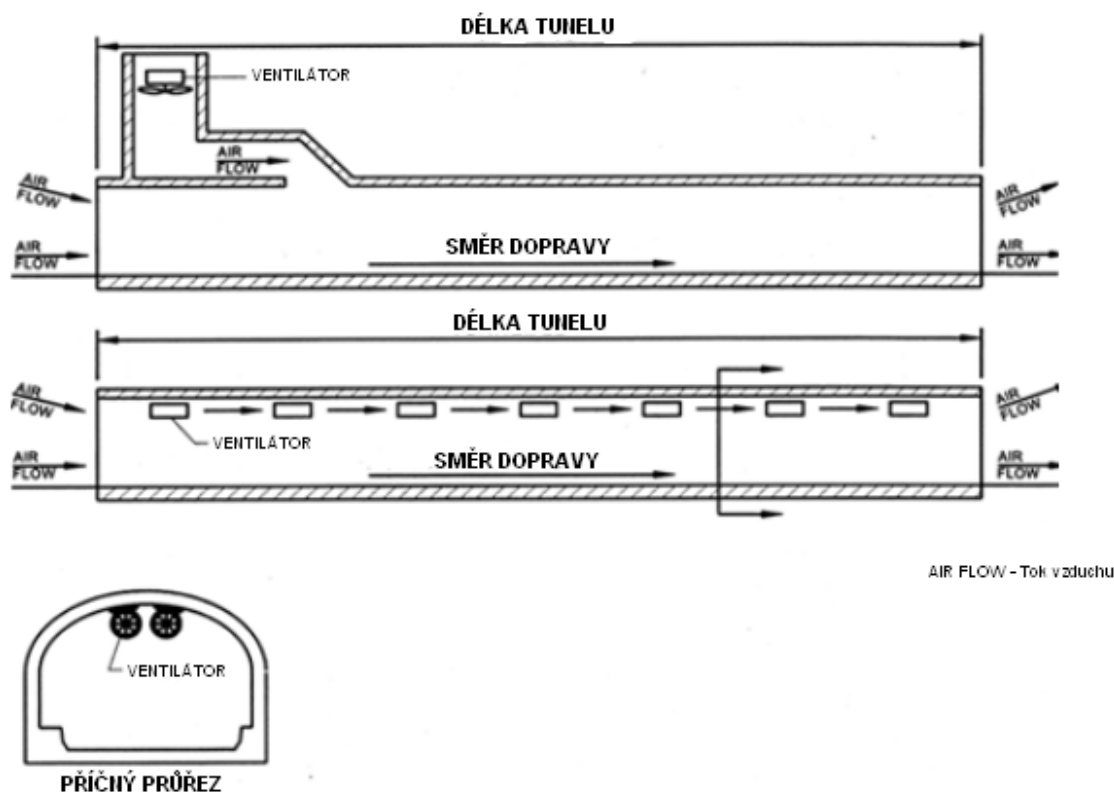
- podélných proudových ventilátorů, které jsou upevněny v podhledu klenby tunelového ostění
- vzduchových dýz, které vhánějí vzduch podélným směrem do tunelové trouby a dýz umístěných za portálem
- větracích šachet s ventilátory vyvolávajícími podélné proudění vzduchu.

Přívod vzduchu u podélného větrání je omezen podélnou rychlostí proudění v tunelu. Při proudění vzduchu tunelem rostou třecí ztráty přibližně s třetí mocninou délky tunelu. Použití tohoto typu větrání je proto omezeno na tunely krátké a tunely s větracími šachtami.



Výhodou je širší a vyšší profil tunelové trouby, protože jím může být dopravováno větší množství vzduchu, aniž by byla překročena povolená podélná rychlost. Rychlost proudění vzduchu v tunelu nesmí překročit  $8 \text{ m.s}^{-1}$  u jednosměrném provozu a  $10 \text{ m.s}^{-1}$  u obousměrného provozu.

Jestliže mají být zmenšeny výstupy vzduchu z portálů nebo omezeny hodnoty škodlivých koncentrací uvnitř tunelu může být realizován pomocný výfukový komín, kterým je odsáván kontaminovaný vzduch [15].



Obrázek 5: Podélná ventilace

Podélného větrání je využito na všech již otevřených dálničních tunelech v ČR [17]:

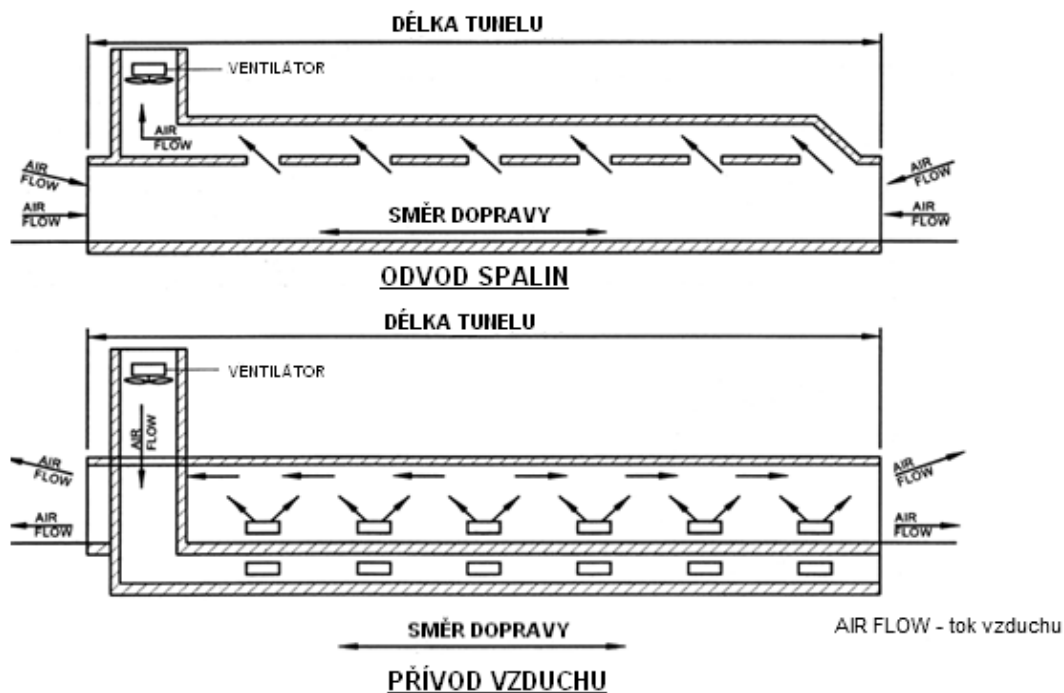
- dálnice D8 – Panenská (2km), Libouchec (0,6 km)
- dálnice D5 – Valík (0,38 km)
- dálnice D47 – Klimkovice (1 km)

## 2.4.2 Polopříčné větrání

Při tomto typu větrání je přídavný vzduch přiváděn separátním kanálem po délce tunelu a vyfukován v pravidelných vzdálenostech vyústky v tunelové troubě. Vyfukovaný vzduch proudí portály do venkovního ovzduší. Rozdělování odcházejícího množství vzduchu na obou portálech se řídí výsledným pístovým působením vozidel a rozdílem teploty a tlaku vzduchu [15].

Delší tunely jsou rozdělovány na více větracích úseků. Počet těchto úseků je závislý na průřezu ventilačního kanálu, potřebném množství vzduchu nutného k ventilaci a na přípustné rychlosti proudění vzduchu ve ventilačním kanálu ( $25 - 30 \text{ m.s}^{-1}$ ) [15].

Při požáru v tunelu bude pomocí reverzního chodu ventilátorů vzduchový kanál použit pro odvod zplodin požáru. Z tohoto důvodu musí větrací otvory ležet nad jízdním prostorem.



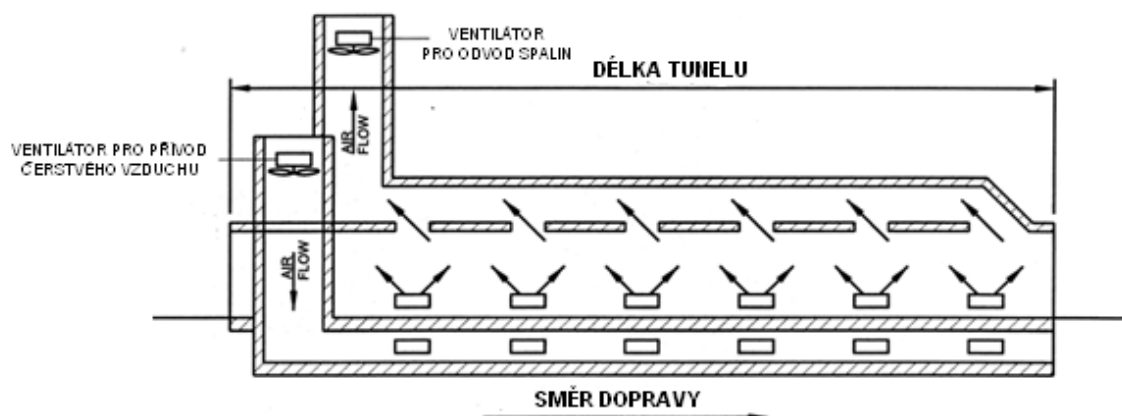
Obrázek 6: Polopříčná ventilace

### 2.4.3 Příčné větrání

Při příčném větrání se vzduch přivádí do dopravního prostoru odděleným vzduchovým kanálem (umístěn buď pod vozovkou, nebo v klenbové části) a znečištěný vzduch je odváděn průduchy v ostění tunelu sběrným vzduchovým kanálem.

Při požáru je čerstvý vzduch přiváděn spodem nebo je vypnut v případě přívodu čerstvého vzduchu shora a kouřové zplodiny jsou odsávány u stropu z jízdního prostoru.

Tento systém je často používán v případě dlouhých tunelů nebo městských tunelů, kde může být obousměrný provoz. Zakouřený prostor je tedy minimální na rozdíl od podélného větrání, kdy dojde k zakouření prostoru vždy od místa požáru k portálu.



**Obrázek 7: Příčná ventilace**

V ČR byl systém příčného větrání s odvodným kanálem pod stropem tunelu využit ve Strahovském tunelu v Praze (2 km), tunelu Dobrovského v Králově poli v Brně (1,2 km) a s odvodným kanálem pod vozovkou v tunelu Mrázovka (1,2 km) a úseku tunelu Blanka (5,5 km) v Praze pod Stromovkou a mezi Prašným mostem a Střešovicemi. V případech, kdy tunel odvodný kanál nemá (tunel Blanka Letná – Prašný most), je odvod vzduchu řešen místně strojovnou [17].

## 2.5 Požár v tunelu

Požár v tunelu se od požáru na otevřeném prostranství zásadně liší ve dvou směrech. Prvním z nich je vliv tepla vznikajícího při požáru na okolí. Při požáru na otevřené ploše mohou teplo a zplodiny hoření unikat do okolí, kdežto při požáru v tunelu mají omezený okolní prostor. To způsobuje, že požáry probíhají mnohem intenzivněji než v otevřeném prostoru. Jak uvádí Ingason v [1], bylo odvozeno, že rychlost uvolňování tepla (HRR – *heat release rate*) při požáru v tunelu může být až 4x vyšší než u požáru stejného materiálu v otevřeném prostoru. Druhý zásadní rozdíl je interakce požáru s tokem vzduchu v tunelu, která může způsobit aerodynamické změny v proudění. Jedná se o drastické změny jako přiškrcení toku vzduchu (vztlakové efekty) a nebo zpětný tok horkých plynů a kouře v proudu čerstvého vzduchu (*back layering*<sup>2</sup>). Tyto efekty nejenom komplikují protipožární zásah, ale také představují vysoké riziko a to zejména propagací toxických zplodin a plynů do velkých vzdáleností od požáru.

<sup>2</sup> *Back layering* = zpětný tok požárních plynů; nastává většinou při nízkých rychlostech proudění vzduchu v tunelu; je to situace, kdy se začne kouř v určité vzdálenosti od požáru šířit zpět směrem k ohnisku požáru

### 2.5.1 Šíření kouře při požáru

Při požárech se teplý dým, jako hrubá vrstva, rozšiřuje rychlostí až několika metrů za sekundu podél tunelového stropu na jednu nebo na obě strany od místa požáru v závislosti na směru a síle proudění vzduchu [2]. Při rychlostech vyšších než je rychlost kritická, se kouř bude šířit pouze ve směru proudění. Klesne-li ovšem rychlost proudění na podkritickou, dojde k šíření kouře oběma směry. Kouř se šíří pod stropem tunelu a u vozovky tak vzniká vrstva čerstvého vzduchu proudícího k požáru. S rostoucí vzdáleností od ohniska požáru se šířící se kouř ochlazuje a ředí. Pokud není odsávání, dochází k jeho poklesu na úroveň proudu čerstvého vzduchu a celý prostor se zakouří. Množství kouře, které požár produkuje je v poměru s rychlostí uvolňování tepla.

### 2.6 Vliv ventilace na maximální rychlost uvolňování tepla

Od nepaměti lidé vědí, že fouknutím vzduchu do ohně podpoří jeho hoření. Naproti tomu hořící zápalka se zhasíná jejím sfouknutím. Tyto dva příklady poukazují na hlavní dva vlivy, které má ventilace na požár. Přivedení čerstvého vzduchu do místa požáru na jednu stranu podporuje hoření, protože je požáru dodán kyslík, na stranu druhou je redukováno spalování ochlazením paliva. Jakýkoliv přívod vzduchu k požáru tedy bude mít chladivý efekt, ale také přivede požáru více kyslíku.

Tunely jsou v podstatě uzavřené prostory. V případě velkého požáru bude rychle spotřebováno množství kyslíku z okolí a rychlost hoření se tedy omezí množstvím kyslíku, které si může požár dále vzít buď přirozenou konvekcí, nebo pomocí ventilačního systému. Tento typ požáru je označován jako „požár řízený ventilací“.

Faktor, který nejvíce přispívá k velikosti požáru je rychlost uvolňování tepla (HRR). Pro daný požární scénář je v zásadě relativně jednoduché spočítat přibližnou hodnotu maximální HRR přípustné pro dané proudění:

$$HRR = \dot{Q}_{\max} = V \eta_{ox} \rho_{ox} \Delta H_{Cox} 10^3 (kW) \quad (1)$$

kde  $V$  ... objemový průtok vzduchu ( $m^3/s$ )  
 $\eta_{ox}$  ... množství  $O_2$  v proudu vzduchu (mol) [obecně 0,21]  
 $\rho_{ox}$  ... hustota  $O_2$  ( $1 \text{ kg/m}^3$  za standardní teploty a tlaku)  
 $\Delta H_{Cox}$  ... spalné teplo  $O_2$ , ve většině případů  $13 \text{ kJ/g}$

tedy rovnice pro maximální HRR může být dále zjednodušena:

$$\dot{Q}_{\max} = 2,73 \times V (MW) \quad (2)$$

Pro příklad, *Channel tunnel* má přibližně kruhový průřez o poloměru 3,8 m. Pokud by se předpokládalo podélné proudění o rychlosti 1,5 m/s, pak by maximální rychlost uvolňování tepla mohla dosahovat:

$$\dot{Q}_{\max} = 2,73(v \times \pi r^2) = 2,73(1,5 \times \pi \times 3,8^2) = 185 \text{ MW} \quad (3)$$

Pokud by se rychlost proudění zvýšila na 2,5 m/s (jako v případě požáru v tomto tunelu v roce 1996), maximální HRR, které může požár dosáhnout, by byla 310 MW.

Pokud HRR není ovlivněna ventilací, jedná se o tzv. „požár řízený palivem“. V tomto případě je HRR limitována uspořádáním a chemickou povahou paliva nikoliv množstvím kyslíku.

### 3 POŽÁRNÍ ZKOUŠKY V SILNIČNÍCH TUNELECH

Požáry v tunelech na pozemních komunikacích nebývají časté, ale jejich dopady mohou být značné, a to nejen co se týče ztrát životů účastníku provozu, poškození zdraví, ale i materiálních škod na majetku účastníků provozu a infrastruktuře. Z těchto důvodů jsou tunely vybavovány požárně bezpečnostními zařízeními a pro jejich provoz jsou přijímána požárně bezpečnostní opatření tak, aby při optimalizaci investičních a provozních nákladů bylo možno zajistit přijatelnou míru rizika [14]. Rozsah požárně bezpečnostního vybavení a opatření je stanoven v technických předpisech vydaných Ministerstvem dopravy ČR. Jedná se o Českou technickou normu ČSN 73 7507 a Technické podmínky TP 98 a TP 154, ve kterých je stanoven rozsah vybavení tunelů na základě začlenění tunelu do bezpečnostní kategorie, která je závislá na délce tunelu a intenzitě dopravy.

Každý tunel je odlišný jak z hlediska stavebního řešení a provedení, vedení trasy, podélných sklonů, délky i územní lokalizace, tak i z hlediska použitého technického vybavení, včetně požární ventilace. Není proto možné jen na základě projektové dokumentace jednoznačně posoudit, zda bude splňovat požadovanou bezpečnostní úroveň. Požárně bezpečnostní úroveň se proto posuzuje na základě důsledné simulace havarijních dopravních stavů. V některých případech mohou poskytovat toto prověření jen zkoušky reálným požárem, což je ovšem velmi nákladné.

#### 3.1 Základní typy zkoušek

Podle **realizační fáze** stavby se zkoušky požárně bezpečnostního zařízení člení na:

- Zkoušky ve fázi projektování
- Zkoušky ve fázi výstavby
- Zkoušky ve fázi uvádění stavby do provozu
- Zkoušky v provozu tunelu

Podle **druhu zkoušek** a způsobu jejich provedení se zkoušky požárně bezpečnostního zařízení člení následovně:

- Zkoušky systému provozního větrání počítačovou simulací
- Zkoušky systému požárního větrání počítačovou simulací
- Zkoušky požárně bezpečnostního vybavení u výrobce
- Zkoušky jednotlivých požárně bezpečnostních zařízení (individuální zkoušky)
- Zkoušky integrace požárně bezpečnostního vybavení do řídicího systému tunelu pozemní komunikace

- Zkoušky komplexní funkčnosti integrovaného řídicího systému
- Zkoušky požáry nízkých výkonů
- Zkoušky požáry středních výkonů
- Zkoušky požáry vysokých výkonů
- Zkoušky zvířeným kouřem
- Zkoušky neinvazivním požárem
- Cvičné zkoušky operátorů obsluhy
- Cvičné zkoušky zásahových jednotek HZS

Vzhledem k charakteru diplomové práce budou podrobněji rozebrány jen následující typy zkoušek.

### ***3.2 Počítačová simulace***

Prověření projektovaných parametrů požárního větrání pomocí počítačové simulace se používá ve fázi projektování stavby. K simulaci jsou využívány simulační programy k výpočtu šíření kouře v tunelových troubách. Ověřuje se účinnost větracího systému v několika rozhodných místech tunelu za různých vstupních hodnot rychlosti a směru proudění zplodin hoření v případě požáru v tunelu. Výkon požáru se předpokládá v rozmezí 30 – 50 MW.

Základními vstupními údaji pro simulaci je typ provozu v tunelu (jednosměrný/obousměrný), projektovaný výkon požáru (MW), směr a rychlost proudění vzduchu v tunelové troubě (m/s) a směr a rychlost protivětru na portálech tunelu (m/s).

Výsledkem simulace požáru v rozhodných místech tunelu je prověření, zda projektované parametry tunelu splňují zejména stanovenou kritickou rychlost proudění v tunelu, stanovení směru proudění v tunelu, průběhy tlaků a průtočného množství v tunelových troubách a další.

### ***3.3 Komplexní zkoušky funkčnosti PBZ a integrovaného řídicího systému***

Komplexní zkoušky se provádějí před uvedením tunelu do provozu a pouze jejich úspěšné provedení umožňuje zahájení zkušebního provozu. Jejich cílem je ověřit funkci jednotlivých systémů v napojení na řídicí systém, včetně stanovených automatických vazeb na ostatní systémy technického vybavení.

U komplexních zkoušek požárního větrání je využíváno vizualizace dýmem, která má informativní charakter o stratifikaci kouře v tunelové troubě. Při těchto vizualizacích je vhodné využít měření optické hustoty kouře v různých výškových úrovních tunelové trouby,

kteří charakterizuje chování kouře za přesně definovaných okrajových podmínek, kterými jsou zejména množství a rychlost uvolňování kouře ( $\text{m}^3/\text{hod}$ ), směr a rychlost proudění v tunelové troubě ( $\text{m/s}$ ), tlakové a teplotní difference v tunelové troubě apod.

### **3.4 Zkoušení reálným požárem**

#### **3.4.1 Zkouška požárem nízkého výkonu**

Zkouška požárem nízkého výkonu je povinná pro všechny tunely delší než 500 m, v nichž je intenzita dopravy vyšší než 2000 voz/den v jednom jízdním pruhu [14]. Podle [15] se jedná se o tunely bezpečnostní kategorie TA a zatíženější tunely kategorie TB.

Při zkoušce požárem nízkého výkonu se počítá s uvolněním energie 1,3 – 1,6 MW, což je reprezentativní pro požár jednoho osobního automobilu, který má typický tepelný výkon 5 MW. Jedním z hlavních cílů zkoušky je ověřit, zda má navržené požární větrání schopnost zajistit stratifikaci kouře pro bezpečný únik osob z nechráněného prostoru tunelu po dobu alespoň 5 minut.

#### **3.4.2 Zkouška požárem středního výkonu**

Při zkoušce požárem středního výkonu se počítá s uvolněním energie v rozmezí hodnot 9 – 12 MW, což odpovídá požáru vozidla typu dodávky, malého nákladního automobilu do 3,5 t s typickým výkonem požáru 15 MW. Zkoušky se provádějí pouze ve výjimečných případech pro tunely delší než 3000 m a s intenzitou vyšší než 20000 voz/den. [14]

#### **3.4.3 Zkouška požárem vysokého výkonu**

Zkouška se využívá jen pro výzkumné účely a to v prostorách vyhrazených pro zkoušky požáry. Neprovádí se v tunelech pozemních komunikací. Počítá se s výkonem požáru 25 – 35 MW, což je odpovídající požáru autobusu nebo nákladního automobilu převážejícího nebezpečné látky.

### **3.5 Požární zkoušky v tunelech v ČR**

#### **3.5.1 Požární zkoušky v tunelu Valík [2]**

Tunel Valík je hlavním objektem obchvatu města Plzně, který je součástí dálnice D5 Praha – Rozvadov. Je to jednosměrný tunel s dvěma tunelovými troubami, jehož délka je 390 metrů. Požární zkoušky v tunelu Valík byly realizovány v květnu roku 2006. Byly provedeny zkoušky studeným a teplým kouřem.



Zařízení na výrobu studeného kouře poskytovalo výkon  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vývin kouře nebyl spojitý, nýbrž cyklický. U zkoušek se studených kouřem chybí vztakový efekt při požáru, tudíž nemohou být všechny výsledky zkoušek směrodatné. Cílem zkoušek bylo prokázat nebo vyloučit možnost ověřování funkčnosti požárně bezpečnostních zařízení (zejména ventilace) před jejich uvedením do provozu s využitím studeného kouře a taky tedy s minimálními náklady.

Během požárních zkoušek byly provedeny dvě reálné zkoušky simulující požár o tepelném výkonu 5 MW (hoření 170 litrů automobilového benzínu v otevřené nádrži o ploše  $4 \text{ m}^2$ ). Při experimentu byly hodnoceny následující parametry požáru:

- Teplotní pole plynů ve svislé rovině
- Teplotní pole na ostění tunelu
- Teplotní pole v bezprostředním okolí plamene
- Hustota tepelného toku
- Rychlost šíření a pokles vrstvy kouřových plynů
- Optická hustota kouře
- Koncentrace vybraných toxikantů
- Rychlosti proudění vzduchu
- Meteorologická situace na portálech tunelu

Pohyb kouře a jeho stratifikace v prostoru byl sledován kamerami umístěnými ve vzdálenostech +35 m a +75 m od tepelného zdroje. Z natočeného videozáznamu byly posouzeny sledované parametry.

### **3.5.2 Požární zkoušky v tunelu Mrázovka [2]**

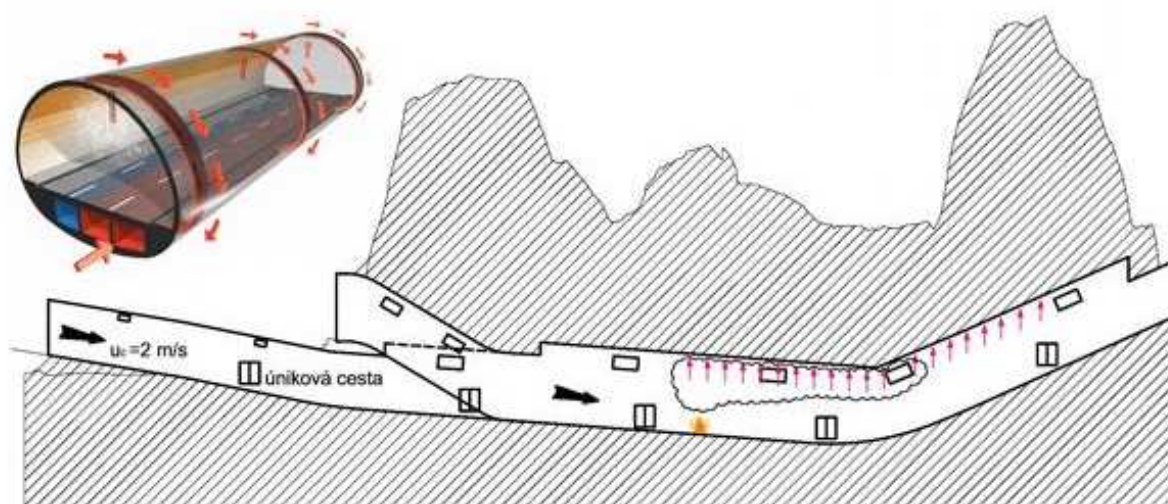
Požární zkoušky v tunelu Mrázovka se uskutečnily ve dnech 13. – 15. srpna 2004. U všech zkoušek byl simulován požár osobního automobilu o výkonu 2,5 – 5 MW (40 litrů benzínu a 10 l nafty v plechové vaně o ploše  $2 \text{ m}^2$ ). Zkoušky se prováděly v třípruhové a dvoupruhové části tunelu.

Účelem požární zkoušky bylo ověřit navržený systém větrání, rychlost detekce požáru elektrickou požární signalizací apod.

Během zkoušek byl ověřen požadavek detekce vzniku požáru do 1 minuty (při všech zkouškách byl požár automaticky detekován mezi 55. a 60. sekundou). I hned po detekci bylo spuštěno požární větrání.

Nejvyšší teploty kouře detekované teplotním kabelem se pohybovaly u zkoušky v třípruhové části v rozmezí  $60 - 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a při zkoušce v dvoupruhu v rozmezí  $80 - 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$

(v místě ohniska požáru v klenbě raženého třípruhového tunelu se předpokládá nejvyšší teplota kouře přibližně 250 °C). Kouř se při těchto podmínkách držel při stropu tunelu. V třípruhové ražené části došlo k výraznému vyplnění prostoru tunelu z důvodu nízkých teplot kouřové vlečky a rychlého chladnutí velice zředěného kouře v profilu tunelu. Ve dvoupruhové hloubené části tunelu kouř vytvořil pod stropem stratifikovanou vrstvu, která se po celou dobu hoření nikdy neochladila natolik, že by kouř začal vyplňovat prostor pod výškou 2 metry, což představuje hranici únikové zóny.



Obrázek 8: Schéma požární zkoušky v tunelu Mrázovka s 3D modelem svodného požárního vzduchovodu v raženém úseku [17]

### 3.5.3 Požární zkoušky v tunelu Klimkovice

Klimkovický tunel se nachází na dálnici D47 v úseku 4707 Bílovec – Ostrava, Rudná. Celková délka trasy úseku 4707 je cca 11 km. Zkušební provoz s účastí veřejnosti byl zahájen v květnu roku 2008 [5].

Jedná se o jednosměrný tunel s dvěma tunelovými troubami s označením A a B. Tunelový tubus A měří 1077 m a je ve směru Brno – Ostrava, tubus B délky 1088 m je ve směru Ostrava – Brno.

Jak je uvedeno v [5] šířka vozovky v obou tubusech je 9,5 m, výška průjezdného profilu 4,8 m, oboustranné chodníky mají šířku 1,2 m a 1,0 m. Uprostřed každé tunelové trouby jsou nouzové zálivy o délce 44 m, šířce 3,5 m a průjezdné výšce 4,2 m. Tubusy jsou provedeny v podélném sklonu 0,6 %. Trouby jsou propojeny pěti propojkami o délce 17 až 31 m, které tvoří záchranné cesty. Střední propojka je spojena s povrchem terénu technologickou vertikální šachtou, která ústí do kabelového kanálu pod objektem trafostanice.

Od listopadu 2007 do března 2008 probíhaly v tunelu Klimkovice funkční zkoušky požárně bezpečnostních zařízení, dále jen PBZ. Nejprve byly provedeny individuální zkoušky

jednotlivých PBZ a následně byla v rámci komplexních zkoušek ověřena jejich koordinace. Koordinace PBZ byla provedena podle požárních scénářů vyhotovených zpracovatelem požárně bezpečnostního řešení stavby a požadavků orgánů vykonávajících státní požární dozor.

Pro komplexní zkoušku PBZ byly navrženy tři požární scénáře. Ve všech třech případech se předpokládala indikace vznikajícího požáru zařízením elektrické požární signalizace. V jednom z případů byla zařízení aktivována tlačítkovým hlásičem požáru a v ostatních dvou došlo k detekci samočinnými hlásiči požáru (teplotní lineární hlásič a bodový kouřový hlásič). V rámci zkoušek byly ověřeny následující stavy (zařízení) [5]:

- uzavření tunelu s využitím proměnného dopravního značení
- funkce nouzové osvětlení tunelových trub a záchranných cest
- zařízení rozhlasu
- ověření systému řízení vzduchotechnických zařízení a souvisejících zařízení
  - automatické spuštění proudových ventilátorů v zasažené tunelové troubě
  - automatické spuštění proudových ventilátorů v nezasažené tunelové troubě
  - uzavření požárních klapek v záchranných cestách v závislosti na tunelové troubě zasažené požárem
  - přetlakové větrání záchranných cest
- kontrola funkčnosti požárního vodovodu (automatický přechod tlakové stanice do režimu požár)
- činnost zařízení při výpadku přívodu elektrické energie (dieselagregát a rotační UPS)

### **Zkoušky systému ventilace**

Klimkovický tunel je větrán podélným větráním s využitím proudových ventilátorů. Jak uvádí [5] jsou v každé tunelové troubě nainstalovány čtyři páry proudových ventilátorů typu APW 1250 RAV 045–6–24–1470, výrobce ZVVZ, a.s. Ventilátory dosahují tahu v hlavním směru proudění 1168 N. Maximální rychlost proudění na výstupu z ventilátoru je 29,5 m/s.

Zkoušky systému ventilace byly realizovány v nadstandardní míře a jejich cílem bylo ověření účinnosti ventilačního systému tunelu při podmínkách, které mohou za jeho provozu nastat. Okolní podmínky byly cíleně navrženy tak, aby se blížily návrhovým limitům. Požární zkoušky měly za úkol prověřit následující situace [5]:

- reverzace proudových ventilátorů při provozu, ověření maximálních výkonových parametrů v reverzním chodu

- reverzace proudových ventilátorů z klidových podmínek
- účinnost ventilace ve směru hlavního tahu/kombinace protivětru simulovaného mobilním ventilátorem
- ověření reakce systému ventilace při dosažení nadkritické rychlosti/kombinace mobilní ventilace
- ověření účinnosti mobilního tunelového ventilátoru

Při průběhu zkoušek bylo snahou vytvořit takové podmínky, které by se blížily reálným podmínkám, ke kterým může při provozování tunelu a při vzniku mimořádné události dojít. Na základě předpokládané intenzity dopravy v tunelu bylo v průběhu zkoušky do tunelové trouby umístěno 14 nákladních a 13 osobních vozidel [5]. Ohnisko požáru bylo situováno ve střední části tunelového tubusu ve směru Ostrava – Brno. K vizualizaci pohybu vzdušiny byly použity dýmovnice uložené v kovových vanách. Byly iniciovány tak, aby zajistily přibližně kontinuální vývin kouře.

Při některých zkouškách byl použit mobilní tunelový ventilátor, který simuloval vyšší



Obrázek 9: Mobilní tunelový ventilátor [17]

protivětr na portále z brněnské strany. K těmto zkouškám byl využit mobilní tunelový ventilátor MTV 2500 rakouského výrobce Rosenbauer. Ventilátor má rozměry 5200/2180/2800 mm, váží 2800 kg a je vybaven naftovým motorem o výkonu 92,7 kW s mechanickým vstřikovacím čerpadlem, turbodmychadlem kouřových plynů, intercoolerem a kapalinovým chlazením. Na podvozku je umístěn axiální ventilátor o průměru 1600 mm s dopravovaným objemovým proudem vzdušiny 213000 m<sup>3</sup>/hod a při využití

v tunelu až 1000000 m<sup>3</sup>/hod. Ventilátor je vybaven obručí s tryskami pro tvorbu vodní mlhy, mlha má dosah až 70 m od ventilátoru [5].

Jak uvádí Zápačka v [17] při zkouškách byly opakovaně prověřovány různé způsoby spouštění požárního režimu větrání a jejich náběh do požadovaného systému proudění. Výchozí stav byl vždy nepříznivý v tom, že se rychlost proudění v tunelu pohybovala v opačném směru, než je směr jízdy ( $u = -2,5$  m/s). Tato situace nastává v noci, kdy v tunelu není provoz a vítr fouká převážně na brněnský portál. Předpokládá se, že k této situaci

přestane docházet po připojení dalších úseků dálnice, čímž dojde ke zvýšení intenzity dopravy.

Měření a dosažené výsledky z tunelu Klimkovice lze v přímé aplikaci vztáhnout pouze k tunelovým stavbám podobné geometrie a podmínkám odpovídajícím podmínkám zkoušek.

### 3.6 Požární zkoušky ve světě

V rámci různých výzkumných programů a projektů (např. EUREKA,...) proběhla ve světě celá řada významných požárních zkoušek, které mají významný přínos pro rozvoj bezpečnosti silničních, ale i jiných tunelů. V následující tabulce je uveden přehled nejvýznamnějších zkoušek, které velkou mírou přispěly k poznání dynamiky požáru v tunelu.

**Tabulka 5: Přehled významných požárních zkoušek v tunelech ve světě [6]**

Tunel	Stát	Rok	
Ofenegg	Švýcarsko	1965	
Glasgow	Velká Británie	1970	
Zwenberg	Rakousko	1975	
Lappeenranta	Finsko	1985	(VTT)
Repparfjord	Norsko	1990–1992	(EUREKA EU-499 ‚Firetun‘)
Hammerfest	Francie	1992	(INERIS)
Charlestown	USA	1993–1995	(Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program)
Shimizu	Japonsko	2001	
Rotterdam	Nizozemí	2002	(2 <sup>nd</sup> Benelux Tunnel)
Runehamar	Norsko	2003	

Mezi nejvýznamnější patří požární zkoušky v tunelu Runehamar, které proběhly v srpnu roku 2003 v opuštěném silničním tunelu na jihozápadě Norska. Jednalo se o čtyři zkoušky, které simulovaly požár těžkých nákladních automobilů. Tunel měří 1,6 km a příčný průřez má 47–50 m<sup>2</sup>. Z bezpečnostních důvodů bylo ostění chráněno deskami PROMATECT®-T. Pokud střed požáru považujeme za kótu 0 m, pak byl strop obložen v celkové délce 75 m (od -21,5 m do +53,5 m) a stěny v délce 39 m (od -12,5 m do 26,5 m) [6].

K vytvoření potřebného proudění byly použity dva mobilní ventilátory MVU 125/140, které dokázaly vyvinout v tunelu před místem zkušebního požáru průměrnou rychlost 3 m/s (rychlost vlivem proti působícímu tlaku klesala až na hodnotu 2,2 m/s) [6].

Popis jednotlivých zkoušek a naměřené rychlosti uvolňování tepla jsou uvedeny v následující tabulce:

**Tabulka 6: Popis jednotlivých zkoušek [6]**

<b>Zkouška</b>	<b>Popis</b>	<b>Celková hmotnost [kg]</b>	<b>q<sub>MAX</sub> [MW]</b>
T1	Dřevěné a plastové (PE) palety	10160 (11010)	202
T2	Dřevěné palety a matrace (PUR)	6390 (6930)	157
T3	Nábytek a příslušenství + pneumatiky	7530 (7750) + 800	119
T4	Plastové nádobí (PS) v kartónových krabicích na dřevěných paletách	2850	66

Nejdůležitější závěry ze zkoušek v Runehameru jsou následující [6]:

- Tepelný výkon požáru běžného těžkého nákladního automobilu může dosáhnout hodnot udávaných pro případ požáru cisterny s benzínem.
- Při požáru těžkého nákladního automobilu mohou teploty v tunelu dosahovat až 1300 °C, čemuž nejlépe odpovídá teplotní křivka RWS.
- Při testech 1 a 2 došlo k pulzování požáru.
- Když požár dosahoval maximálního výkonu, snižovala se rychlost větrání a částečně docházelo ke zpětnému šíření kouře.

## 4 MODELOVÁNÍ POŽÁRU

První teoretické návrhy modelů zaměřené na simulování požáru uvnitř objektu vznikly před více než 50 lety. Prvotně šlo především o formulaci zjednodušených výpočtových postupů a základů zónových modelů, později se s rozvojem výpočetní techniky a metody CFD modely doplňovaly o modely typu pole. Současně s matematickými modely se využívaly experimentální (fyzikální) modely požáru. [8]

Modely požáru v uzavřeném prostoru se člení na dvě základní kategorie – modely fyzikální a matematické. Podrobné rozdělení je uvedeno na *Obr.10*.

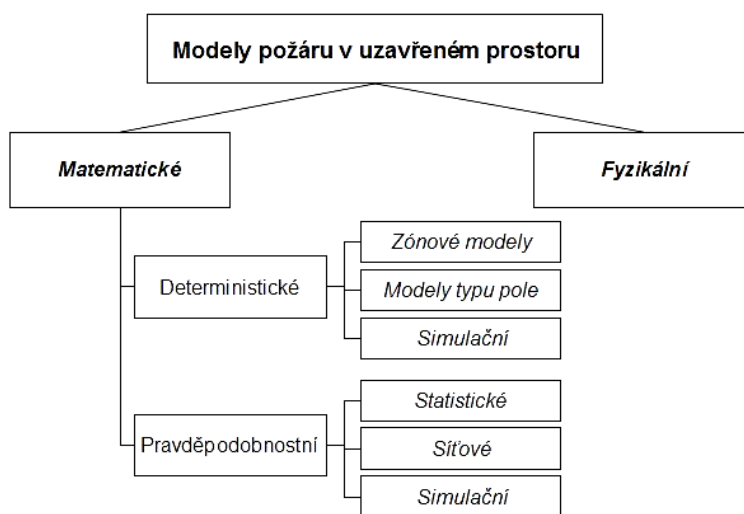
Principem fyzikálních modelů je napodobení požáru za zjednodušených fyzikálních podmínek. Modely mohou být velkorozměrové, kdy se podmínky zkoušek blíží reálným podmínkám při požáru, avšak jejich proveditelnost je velmi nákladná někdy až neproveditelná. Často se provádí modely ve zmenšeném fyzikálním měřítku, kdy cílem této metody je, v konečném důsledku, stanovení fyzikálního i chemického chování sledované soustavy za požáru.

Matematické modely využívají přednosti výpočetní techniky a řeší jednotlivé požární scénáře pomocí souboru rovnic popisujících chování fyzikálních soustav za požáru. Jejich využití je zejména pro stanovení konkrétního chování fyzikálních soustav za požáru.

Matematické modely se dělí do dvou základních skupin:

- **pravděpodobnostní** – rozvoj požáru je popsán řadou náhodných událostí anebo stavů
- **deterministické** – průběh požáru je určen fyzikálními a chemickými ději

Na následujícím obrázku je uvedeno dělení modelů požáru v uzavřeném prostoru:



Obrázek 10: Dělení modelů požáru v uzavřeném prostoru [8]

## 4.1 Deterministické modely

Deterministické modely předpovídají rozvoj požáru a procesu s ním spojených na základě řešení matematických rovnic popisujících chemické a fyzikální děje při požáru. Pravděpodobnost, s jakou dojde k požáru a jeho rozvoji, není přímou součástí tohoto způsobu řešení. [8]

Fyzikální podmínky, které určují rozvoj a výsledky požáru, se u těchto modelů nazývají požárními scénáři. Požární scénáře zahrnují množství a uspořádání hořlavých látek, dispozici a charakter objektu, provedení požárně bezpečnostních systémů, místo vzniku požáru, rozmístění a způsobilost evakuovaných osob a další proměnné mající vliv na výsledné hodnoty popisující požár. Vstupní údaje se mohou lišit podle charakteru události, ale obecně je můžeme rozdělit do několika skupin. Parametry týkající se požárního zatížení, výměny plynů s okolím a popisu prostoru (místnosti) [8]. Rozsah deterministických modelů požáru může být široký, počínaje modely jednoduchých situací majících pouze několik základní vstupních parametrů, až po složité řešení požáru budovy o několika místnostech. U složitějších příkladů pak může výpočet daného modelu trvat několik hodin až dní v závislosti na složitosti a výkonnosti hardwarového vybavení. Složité modely mohou rovněž řešit buď mnoho fyzikálně chemických dějů, nebo detailně několik vybraných dějů [8].

Deterministické modely rozdělujeme do dvou základních skupin:

- zónové modely
- modely typu pole (tzv. CFD modely)

### 4.1.1 Zónové modely

Zónové modely se zpravidla dělí na jednozónové a dvouzónové. Jejich použití je závislé na typu řešené úlohy. V případě jednozónových modelů je celý prostor brán jako homogenní, v případě dvouzónového modelu je rozdělen na dvě homogenní vrstvy, jež mají stejnoměrnou hustotu, teplotu a koncentraci plynů. Dolní studená vrstva se ochlazuje přívodem vzduchu prostřednictvím otvorů z vnější strany objektu a horní horká vrstva se zahřívá vzestupným proudem zplodin požáru. Model pracuje zejména s parciálními diferenciálními rovnicemi pro zachování hmoty a energie mezi jednotlivými vrstvami. Zónové modely obvykle řeší otázku teploty horké vrstvy, polohy rozhraní mezi horkou a studenou vrstvou a výměnu plynů s okolím přes otvory. Existují i modely řešící další specifické problémy, jako je doba reakce sprinklerových hlavíc apod. [8]



Předností zónových modelů je jednoduchost řešení. Výpočet probíhá mezi dvěma kontrolní objemy, což jej urychluje a snižuje nároky na hardware. Nejznámějšími a nejvíce používanými zónovými modely jsou ARGOS, BRANZFIRE a CFAST. Nevýhoda je možnost využití jen pro běžné uzavřené prostory, nejsou vhodné pro využití u prostorů s jedním převažujícím rozměrem (tunely, šachty...). Výsledky se aplikují pro předpověď rozvoje požáru a naplnění prostoru kouřem, včetně okamžiku celkového vzplanutí. Výsledky jsou přímo použitelné pro bezpečnost osob, detekci požáru a hašení. Mohou být využity i pro chování konstrukcí při požáru. Nutné je brát v úvahu, že teplota horní vrstvy je pouze průměrnou hodnotou, maxima tedy mohou být mnohem vyšší.

#### 4.1.2 Modely typu pole

Modely typu pole využívají pro modelování požáru základní rovnice zachování a přenosu energie, hybnosti a hmoty. Jsou založeny na metodě rozdělení prostoru do velkého počtu kontrolních objemů. Modely umožňují simulovat i vlastní chemické procesy a chování hořlavých látek při působení tepla a tepelné radiace. Zvláštní důležitost má modelování turbulence, pro kterou se využívá množství empirických rovnic. Nejvíce používanou výpočtovou metodou jsou algoritmy dynamického proudění kapalin CFD (*computational fluid dynamics*).

Výhodou je využití pro výpočty pohybu plynných zplodin hoření (kouře) v uzavřeném prostoru. Lze využít pro celou řadu problémů, které zónové modely nemohou pokrýt. Například je možné zahrnout vliv teplotních gradientů v prostoru před požárem, stejně jako vliv tlaku venkovního vzduchu. Nevýhodou CFD modelů jsou vysoké nároky na hardware, výpočet mnohdy trvá několik hodin až dnů, navíc zadávání vstupních dat může být velmi komplikované. O přesnosti a náročnosti výpočtu rozhoduje velikost buněk vzniklých rozdělením prostoru do kontrolních objemů (tzv. síťování). Platí, čím menší jsou kontrolní objemy, tím přesnější, ale i náročnější jsou výpočty. [8]

CFD programy specializované na modelování požáru a pohybu zplodin hoření jsou FDS, SmartFire nebo SOFIE. Pro modelování požáru tunelu v rámci diplomové diplomant zvolil jako nejvhodnější program FDS a jeho nástavbu PyroSim 2010.

## Program FDS

Program FDS (*Fire Dynamics Simulator*) je nejrozšířenější program pro modelování požáru založený na výpočtové metodě CFD. Model numericky řeší *Navier-Stokesovy rovnice*<sup>3</sup> pro nestacionární proudění s důrazem na přenos tepla a kouře od vzniklého požáru. Parciální diferenciální rovnice pro zachování hmoty, hybnosti a energie jsou uspořádány jako rovnice konečných rozdílů, jejichž výsledky se během výpočtu zachycují do pravoúhlé třírozměrné sítě. Určení tepelné radiace vychází z metody konečných objemů. Pohyb kouře a výtok vodních kapek ze sprinklerových hlavice se simuluje prostřednictvím *Lagrangeovy metody*. [[8]] Program umožňuje i modelaci situací, ve kterých požár nefiguruje, například ventilaci v budově apod. Výsledky modelů jsou využívány k zajištění bezpečnosti staveb před jejich realizací, zhodnocení bezpečnostních podmínek již existujících staveb, rekonstrukci požáru během vyšetřování dané události a jako pomoc při výcviku hasičů.

Program FDS byl vyvinut v Národním institutu pro standardizaci a technologii (*National Institut of Standards and technology*, dále jen NIST), což je instituce zřízená Ministerstvem průmyslu a obchodu USA ve spolupráci s VTT Střediskem technického výzkumu ve Finsku. NIST byl založen v roce 1901 a jeho hlavním cílem je podpora inovací a průmyslové konkurenceschopnosti USA prostřednictvím vědeckých měření, standardů a technologií. Činnost instituce je organizována několika laboratořemi, z nichž s požární bezpečností souvisí především laboratoř pro stavby a požární výzkum (*Building and fire research laboratory*).

## 4.2 Aplikace CFD modelů na požáry v tunelu

Metoda CFD je dnes využívána jako základ pro simulování požáru v tunelu. Napomáhá k rychlému rozvoji simulací a obsahuje mnoho potřebných fyzikálních modelů, jako jsou modely turbulentního proudění, vztlkových efektů, spalování a sálání.

Požár samotný může být v modelu reprezentován jako zdroj tepla, jehož pozice, rychlost rozvoje a maximální velikost vyžaduje uvážení, která mohou ovlivnit technickou podstatu modelu.

Obecně existuje mnoho způsobů jak popsat požár a zdroj kouře v CFD modelech. Pokud je zdroj požáru známý, například se jedná o hoření kaluže konkrétního paliva, je možné použít model spalování detailně popisující daný proces. Tento postup se využívá také k simulaci požárního experimentu k porovnání s fyzikálními předpoklady. Při simulaci

---

<sup>3</sup> **Navier-Stokesova rovnice** – rovnice popisující proudění nestlačitelné Newtonovské kapaliny

spalování by byly využity další parciální diferenciální rovnice popisující palivo, oxidační prostředek a produkty spalování. Je třeba se zmínit, že uvedený postup může uvést další nejasnosti týkající se schopnosti modelu spalování přesně předvídat daný proces. Častým nedostatkem se zdá být neschopnost předvídat výkonnost spalování vyplývající z teplot, které jsou příliš vysoké. Několik modelů spalování může být k dispozici v CFD kódu, ale každý z nich podává odlišné výsledky. Je proto nevhodné využít tyto modely bez předchozího nastudování jejich schopností.

Při modelování požáru souvisejícím s dopravou a návrhem větrání může být stanovení zdroje hoření mnohem více komplikované, protože není známo, jak bude vozidlo hořet a také jaké bude jeho spalné teplo. Jeden způsob je stanovit rozsah hořlavosti, rozdílné způsoby iniciování podle typických dopravních situací a odhadnout racionální dobu vývinu požáru a jeho velikost.

### **4.3 *Ověřování matematických modelů***

Pro využití výsledků matematických modelů požáru je důležité ověřit si dané postupy z hlediska fyzikální interpretace a matematické přesnosti. Toto ověření zahrnuje kontrolu, zda jsou teoretické podklady a předpoklady, použité v modelu, správné a zda model neobsahuje vážné matematické chyby. Pro takovou kontrolu je nutný ověřovací postup. Ten zkoumá adekvátnost teoretických podkladů a matematických postupů a jejich začlenění do modelu.

Vhodným prostředkem pro ověření matematických modelů jsou referenční požární zkoušky. Jsou realizovány ve zkušebních laboratořích v několika státech (nejvíce státy Severní Evropy a USA), které pak vytváření databáze naměřených dat, která slouží jako podklad pro uživatele matematických modelů.

Největší soubor požárních zkoušek byl proveden v NIST, kde byla během desítek let z naměřených dat, získaných ze zkoušek ve zmenšeném i skutečném měřítku, vytvořena velmi široká databáze.

Ke každé zkoušce musí být kromě naměřených dat vyhotovena technická dokumentace, která předkládá základní informace o zkoušce, jejím průběhu a přesnosti použitých přístrojů.

## 5 MODEL POŽÁRU V TUNELU

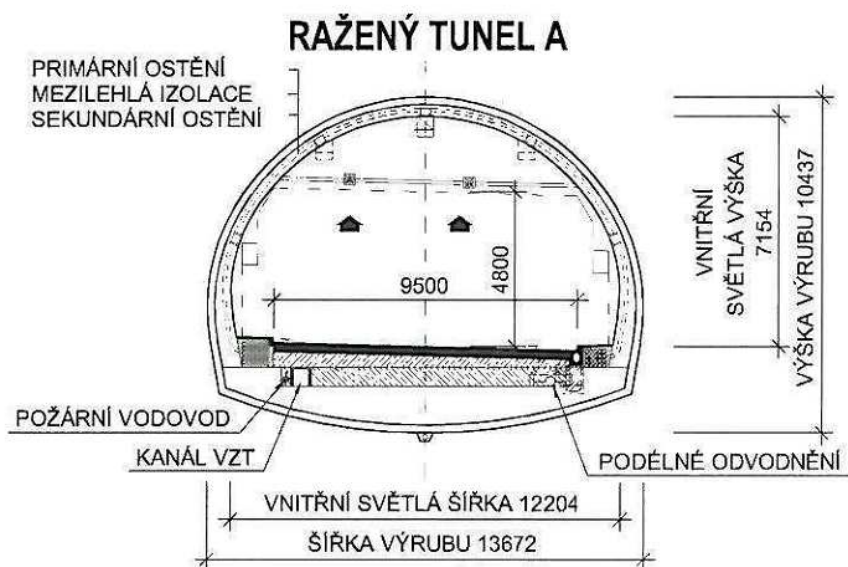
Pro modelování požáru v rámci diplomové práce byl diplomantem zvolen program *FDS 5* a jeho uživatelská nástavba *PyroSim 2010*. *PyroSim 2010* je komerčním programem, ale společnost poskytuje možnost využití třicetidenní zkušební verze. Hlavním kladem programu je jeho jednoduchost pro uživatele bez předchozích zkušeností s modelováním požáru.

Program *PyroSim 2010* je interaktivní, grafické uživatelské prostředí, které umožňuje uživateli snadnější zadávání parametrů, modelování konstrukcí apod. Program umožňuje import i export FDS souborů a zobrazuje model ve 2D i 3D geometrii. Pro vizualizaci výsledků je využit program *Smokeview 5.4.6*.

Pro modelování byly navrženy požární scénáře, v nichž se měnily dané parametry jako délka tunelu, rychlost proudění vzduchu na portále tunelu, umístění ohniska požáru vzhledem k pozici ventilátorů a rychlost a směr proudění vzduchu na výstupu ventilátoru.

### 5.1 Popis modelu tunelu

Model tunelu byl vytvořen přibližně podle rozměrů tunelu Klimkovice. Na *obr.11* je grafické znázornění rozměrů tunelového tubusu A (Ostrava – Brno).

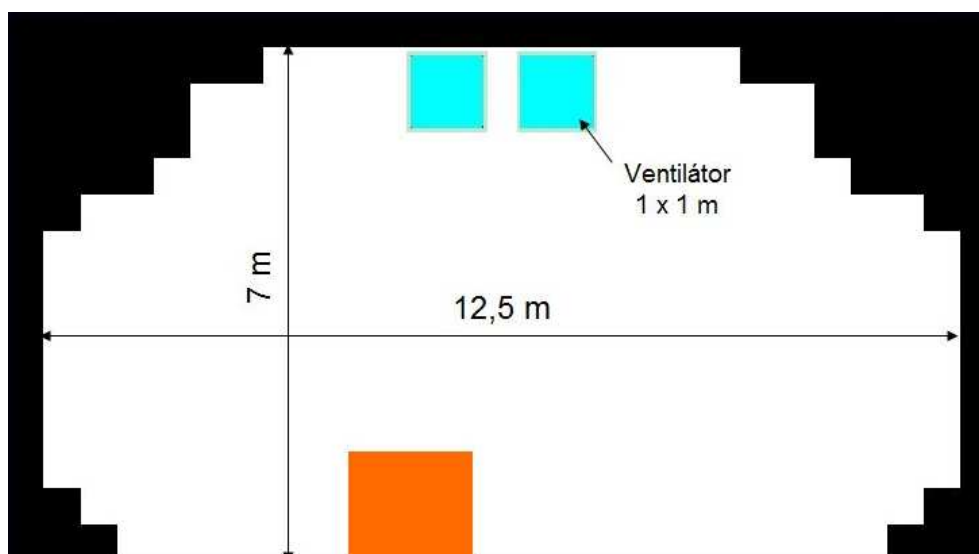


Obrázek 11: Tunel Klimkovice – rozměry tubusu A

Model tunelu má v nejširším místě šířku 12,5 m, světlá výška je 7 m. Větrání zajišťují proudové ventilátory umístěné v párech pod stropem tunelu. Modely ventilátorů byly rovněž připodobněny k reálným rozměrům. V tunelu Klimkovice jsou použity axiální proudové

ventilátory o průměru  $D = 1250$  mm. V modelu jsou ventilátory zpodobněny jako kvádry s vnitřním rozměrem  $1 \times 1$  m.

Na obr.12 je graficky znázorněn příčný průřez tunelu.



Obrázek 12: Příčný průřez modelu tunelu

## 5.2 Popis modelu v programu FDS (PyroSim)

Model tunelu je vytvořen v síti (MESH) o parametrech, které odpovídají rozměrům tunelu. Velikost jedné buňky sítě je  $0,5 \times 0,5$  m. Přirozené proudění vzduchu v tunelu je vytvořeno pomocí povrchu typu SUPPLY, který je umožňuje zadat rychlost proudění a další parametry. Ventilátory jsou vytvořeny pomocí povrchu FAN, který je podobný jako SUPPLY, ale je více specifický pro ventilátory a uživatel má opět možnost nastavit rychlost proudění vzduchu aj. Materiály a jejich parametry byly použity z knihovny programu a jsou uvedeny v následující tabulce. Pokud potřebný materiál nebyl definován v knihovně programu, byl připodoben k materiálu jemu podobnému.

Tabulka 7: Materiály a jejich vlastnosti

Materiál	Využití	Hustota $kg.m^{-3}$	Měrné teplo $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$	Emisivita	Vodivost $W.m^{-1}.K^{-1}$
Beton	ostění tunelu	2280,0	1,04	0,9	1,8
PVC	automobil	1380,0	1,0	0,95	0,1
Ocel	automobil/ventilátor	7850,0	0,46	0,95	45,8

Časový průběh výpočtu modelu je závislý na složitosti zadání. Pro tunel délky 100 m a nízký výkon ventilátorů výpočet trval cca 3 – 4h, pro tunel délky 200 m už se doba trvání výpočtu pohybuje kolem 6 hodin. Diplomantem je předpokládáno, že výpočet požáru pro tunel reálných rozměrů s ventilátory nastavenými na maximální výkon by mohl trvat i několik desítek hodin.

### **5.3 Výstupy programu FDS**

Výsledky modelů byly zpracovány graficky. Průběh získaných výsledků je vykreslen ve 3D vizualizaci a zadané veličiny jsou zaznamenávány do tabulkového editoru. Program umožňuje několik způsobů, jak sledovat dané veličiny:

#### **5.3.1 Roviny (slices)**

Veličina je sledována v zadané rovině (X, Y, Z) a její průběh je znázorněn graficky pomocí izoterem v programu *Smokeview*. Je možno zobrazit i vektorový průběh.

Byl sledován průběh teploty ( $X = 5,5$  m) a rychlosti proudění ( $X = 5,0$  m;  $Z = 6,5$  m).

#### **5.3.2 Statistika**

Veličina je sledována v celé síti nebo ve zvolené části prostoru. Může být vyhodnocena minimální, maximální, střední hodnota a další.

V celém prostoru byl vyhodnocen průběh střední hodnoty teploty a viditelnosti. Informativně byl rovněž sledován průběh teplot v prostoru do výšky 2 m.

#### **5.3.3 Zařízení (devices)**

V modelu mohou být umístěny měřicí a vyhodnocovací zařízení – termočlánky, průtokoměry, odsávače vzorků, detektory kouře a další. Hodnoty jsou zaznamenávány v čase do tabulkového editoru.

Termočlánky byly umístěny na ostění tunelu do výšky 4 m nad úroveň vozovky. Jednotlivé měřicí body byly rozmístěny v intervalu 20 m. V tunelu délky 100 m bylo tedy rozmístěno 5 párů. Naměřené hodnoty na termočláncích jsou uvedeny v příloze č.1.

## 5.4 Požární scénáře

V rámci diplomové práce bylo modelováno několik situací, ve kterých se měnily dané parametry a jednotlivé výsledky byly porovnány.

Tabulka 8: Parametry modelových situací

Modelová situace	Parametry modelových situací				
	Typ větrání	Výkon požáru	Délka tunelu	Rychlost proudění vzduchu	
				na portále tunelu	na výstupu ventilátoru
1	podélné	5 MW	100 m	1 m/s	5 m/s
2	podélné		200 m	1 m/s	$\pm 5$ m/s
3	podélné		100 m	5 m/s	$- 25$ m/s
4	přirozené		250 m	0,5 m/s	–

I když byl tunel připodobněn k reálným rozměrům tunelu Klimkovice, časová náročnost výpočtu jednotlivých modelů nedovolila počítat modely v reálné délce tunelu, která je přibližně 1100 m, a s reálným výkonem ventilátorů (výkon ventilátorů použitých v tunelu Klimkovice je 33,5 m<sup>3</sup>/s a rychlost proudění na výstupu 29,5 m/s). Výsledky tedy nemusí odpovídat reálné situaci. Účelem bylo zhodnotit klady a zápory programu a hlavní faktory, které ovlivňují průběh zakouření. V následující tabulce jsou uvedeny vlastnosti okolního prostředí, které se v jednotlivých modelech nemění.

Tabulka 9: Parametry okolního prostředí

Parametry okolního prostředí	
<i>Atmosférický tlak</i>	101325 Pa
<i>Vlhkost vzduchu</i>	40 %
<i>Teplota prostředí</i>	20 °C
<i>Rychlost proudění vzduchu</i>	0,5 – 5 m.s <sup>-1</sup>
<i>Nadmořská výška</i>	250 m.n.m.

Závěrečné zhodnocení bude provedeno porovnáním výsledků v 3D vizualizaci a srovnáním průběhu sledovaných veličin.

### 5.4.1 Modelová situace 1

Požár je simulován v podélně větraném tunelu o délce 100 m. Ohnisko požáru je téměř v polovině délky tunelu. Na portálech je nastaveno proudění o rychlosti 1 m/s a vzduch proudí ve směru portál 1 – portál 2. Nucené větrání probíhá ve směru přirozeného proudění. Jsou modelovány dvě situace:

- jsou použity dva páry proudových ventilátorů
- je použit pouze jeden pár proudových ventilátorů

V reálné situaci by v tunelu o délce 100 m nebylo zapotřebí použití nuceného větrání, avšak model má sloužit jako poznatek, zda má ohnisko požáru vliv na zakouření tunelu. Snažila jsem se pomocí simulace zjistit, jestli je šíření kouře při požáru ovlivněno tím, kde požár vznikne. Porovnání bude provedeno srovnáním průběhu zakouření.

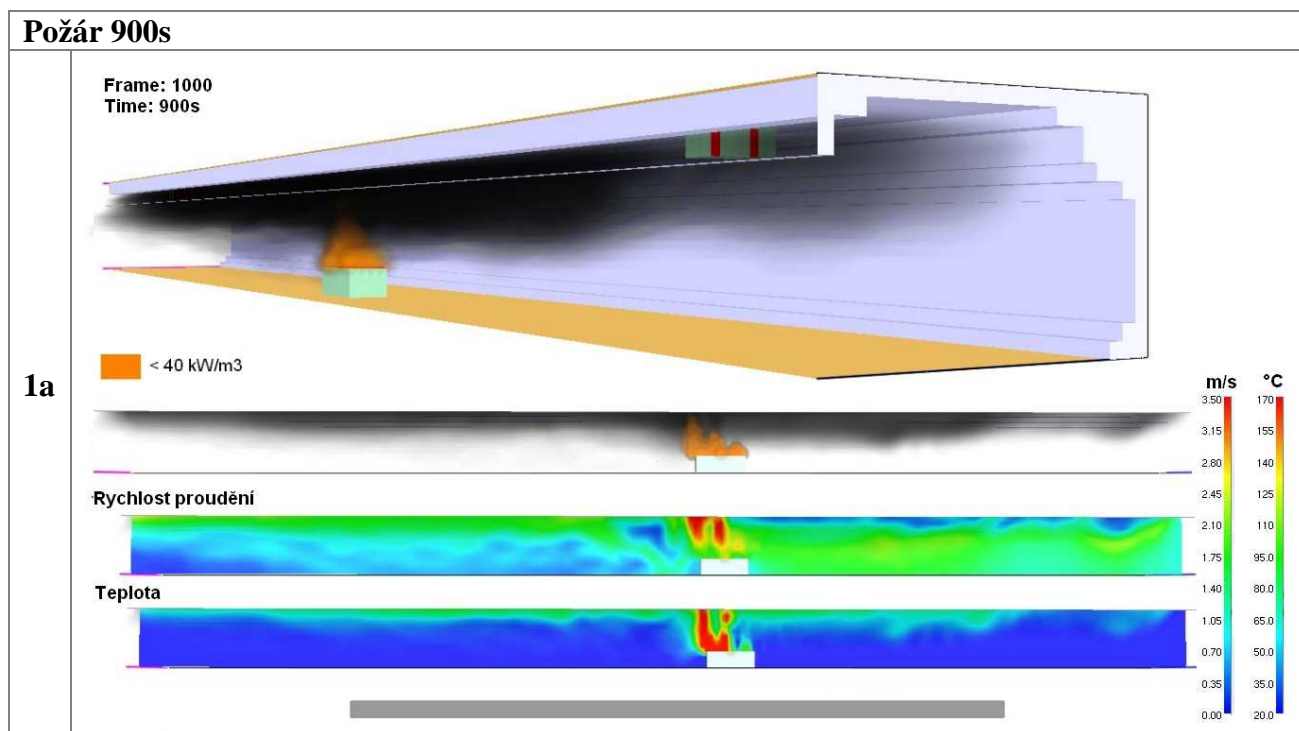
V následující tabulce jsou uvedeny zadané parametry dílčích modelů.

Tabulka 10: Parametry modelové situace 1

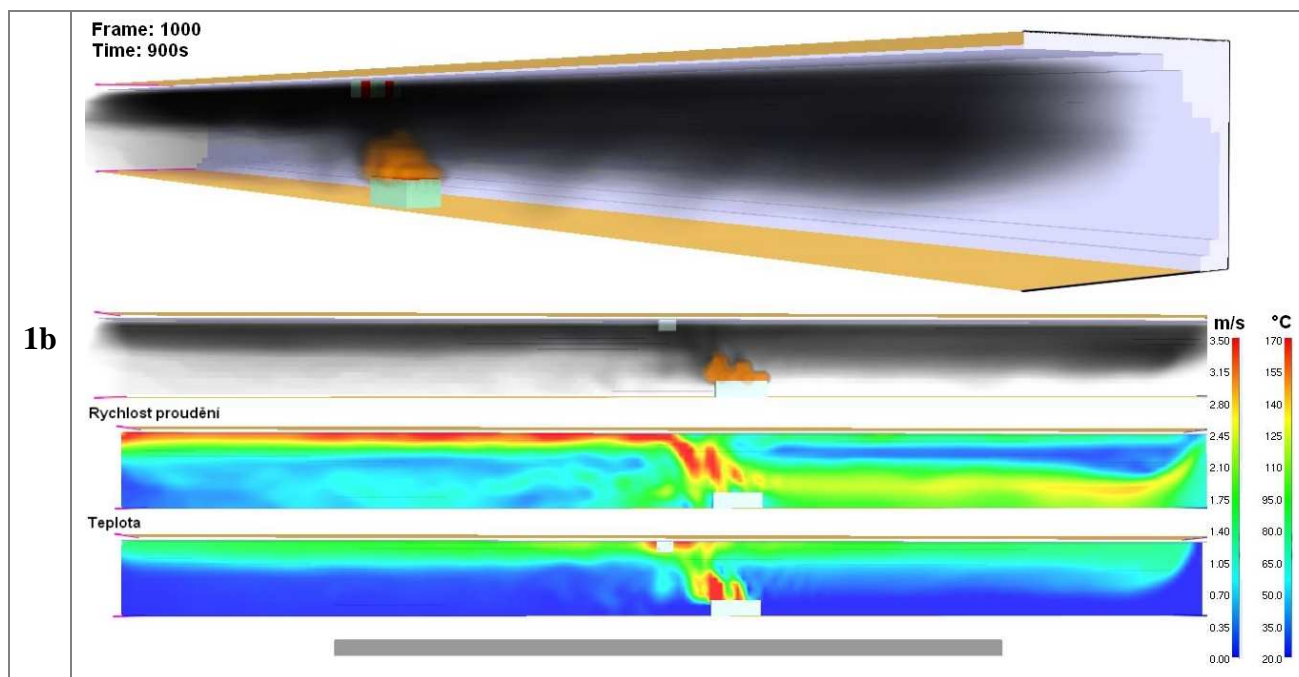
	Model č.1a			Model č.1b		
<i>Délka tunelu</i>	100 m					
<i>Rychlost proudění vzduchu na portále tunelu</i>	1,0 m.s <sup>-1</sup>					
<i>Rychlost proudění vzduchu na výstupu z ventilátoru</i>	5 m.s <sup>-1</sup>					
<i>Požár 5MW</i>	X [m]		Y [m]		Z [m]	
	4,65		41,75		0,00	
	6,35		46,25		1,50	
<i>Ventilátory</i>	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
	5,45	21,0	5,85	5,45	50,0	5,85
	8,05	22,5	6,95			
	5,45	88,5	5,85	8,05	51,5	6,95
	8,05	90,5	6,95			

Na Obr.13 je znázorněno porovnání obou modelů z hlediska zakouření v 15. minutě požáru. Podrobnější průběh zakouření je uveden v příloze č.1.

Obrázek 13: Model 1 – 15. minuta požáru







Je vidět, že v příkladě 1a se drží kouř u stropu tunelu, kdežto v druhém případě klesá více dolů k vozovce. V druhém případě je náznak jevu *back layering*, neboli zpětný tok požárních plynů, což je jev typický pro pohyb kouře v tunelu. Dochází k němu, pokud je rychlost proudění vzdušiny v tunelu menší, než je kritická rychlost pro daný výkon požáru a průřez tunelu [2].

Rychlost na výstupu ventilátoru je nastavena velmi nízká, ale i přesto je vidět rozdíl v průběhu rychlosti proudění. Teplota je v příkladu 1b znatelně vyšší v prostoru pod stropem tunelu. Dalo by se to vysvětlit činností ventilátoru, který je v blízkosti požáru a distribuuje horký vzduch a zplodiny hoření po délce tunelu ve směru proudění.

Nejvyšší rychlost, které proudění v tunelu dosahuje je podle obrázku 3,5 m/s. Maximální teploty dosahují 170°C.

## 5.4.2 Modelová situace 2

Model byl vytvořen v tunelu délky 200 m. Byly modelovány dva případy, které budou navzájem porovnány:

- přirozené proudění na portálech tunelu 1 m/s, dva páry proudových ventilátorů o výkonu 5 m/s
- přirozené proudění na portálech tunelu 1 m/s, dva páry proudových ventilátorů o výkonu 5 m/s v reverzním chodu, další automobily v tunelu

Potřeba odvést kouř směrem proti přirozenému větrání může nastat tehdy, když dojde k požáru automobilu jedoucího tunelovou troubou proti směru přirozeného proudění. Prostor

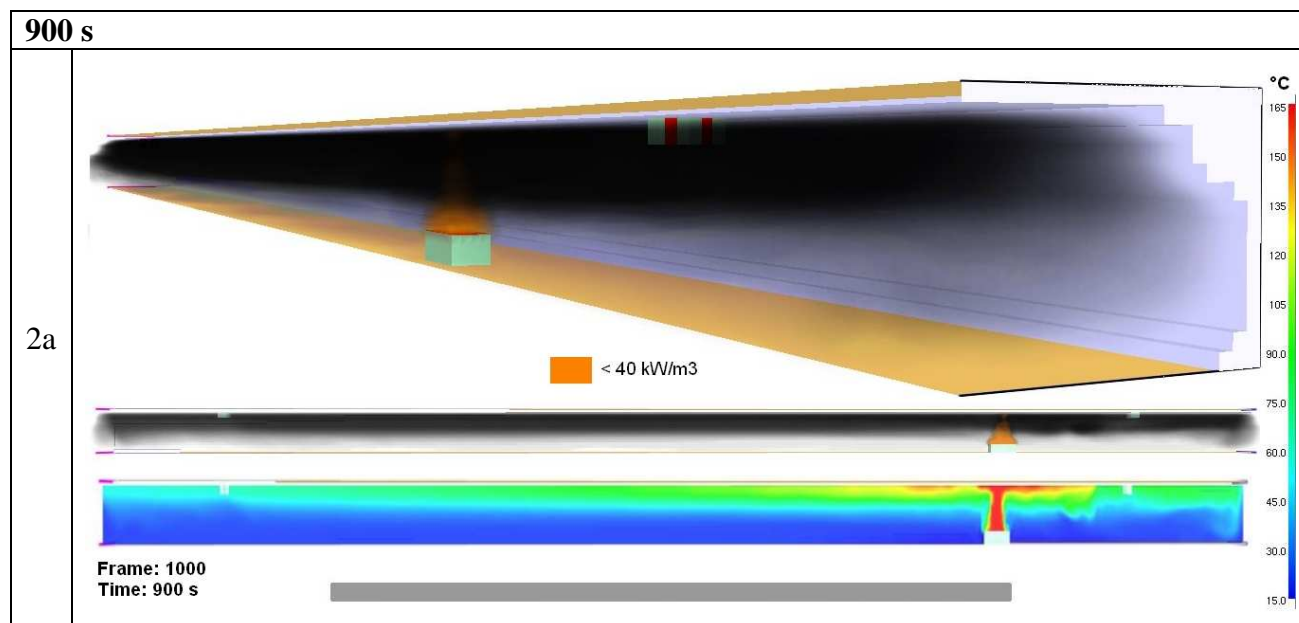
před hořícím vozidlem bude prázdný a může jím být odváděn kouř ven z tunelu. Zatímco za požárem se může vytvořit kolona aut, které již z tunelu nemohou vyjet, protože se například z důvodu úzkého prostoru nemohou otočit do protisměru. Je proto žádoucí spustit požární větrání tak, aby byl kouř odveden ven z tunelu výjezdovým portálem, tak aby nebyli ohroženi ostatní účastníci provozu.

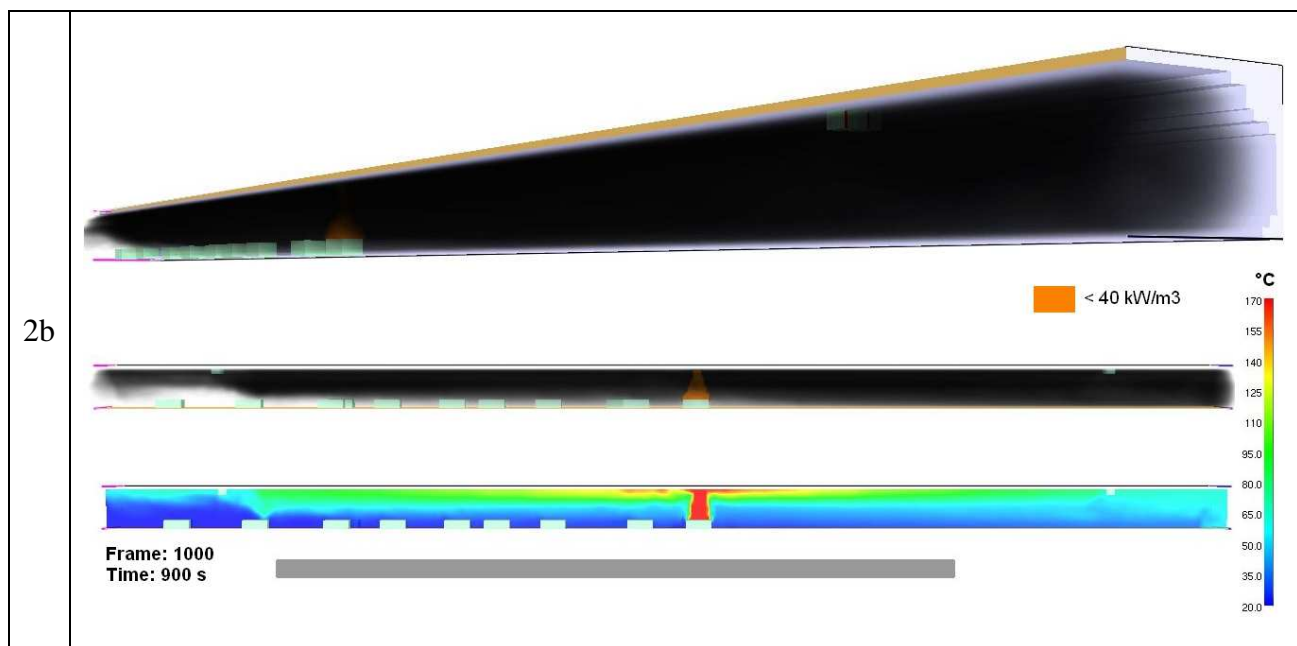
**Tabulka 11: Parametry modelové situace 2**

				Model č.2a		Model č.2b	
Délka tunelu				200 m			
Rychlost proudění vzduchu na portále tunelu				1,0 m.s <sup>-1</sup>			
Požár	Výkon [MW]			X [m]	Y [m]	Z [m]	
	5			4,65 6,35	41,75 46,25	0,00 1,50	
Ventilátory	X [m]	Y [m]	Z [m]	Rychlost proudění na výstupu [m/s]			
	5,45 8,05	20,0 21,5	5,85 6,95	5 m/s		- 5m/s	
	5,45 8,05	178,5 180,5	5,85 6,95				

Na Obr.14 je znázorněn průběh zakouření a teplot v 15. minutě požáru. Celkový průběh zakouření je uveden v příloze č.1.

**Obrázek 14: Model 2 – 15. minuta požáru**





Z obrázků je patrné, že v druhém případě je zakouření tunelu mnohem větší než v případě prvním. U modelu 2a zůstává nezakouřená vrstva téměř v celé délce tunelu, kdežto v situaci 2b dojde k zakouření prostoru až k vozovce. Z příkladu vyplývá, že rychlost proudění vzduchu na výstupu ventilátoru u modelu 2b je zvolena velmi nízká. Ventilátory nemají téměř žádný vliv na proudění vzduchu a rychlost přirozeného proudění je natolik nízká, aby byl kouř z tunelu odveden.

V následující modelové situaci bude zvolená rychlost mnohem vyšší, blížíci se reálným podmínkám.

### 5.4.3 Modelová situace 3

Třetí modelová situace byla provedena v tunelu o délce 100 m, kde byl použit jeden pár ventilátorů. Rychlost proudění vzduchu na výstupu ventilátoru byla nastavena na 25 m/s, což odpovídá reálným podmínkám. V tunelu byly umístěny další překážky představující auta a bylo sledováno, zda bude kouř odvětrán mimo jejich dosah. Rychlost proudění na portále tunelu byla nastavena na 5 m/s a ventilátory byly nastaveny na reverzní chod, tedy proti směru přirozeného větrání. Výpočet byl proveden pro 5 min požáru.

Proměnné parametry jsou umístění ventilátoru a ohniska požáru. Byly modelovány následující situace:

- a) požár osobního vozidla v 1. čtvrtině délky tunelu, ventilátor umístěn v polovině délky tunelu
- b) požár osobního vozidla v 1. čtvrtině délky tunelu, ventilátor umístěn ve 3/4 délky tunelu

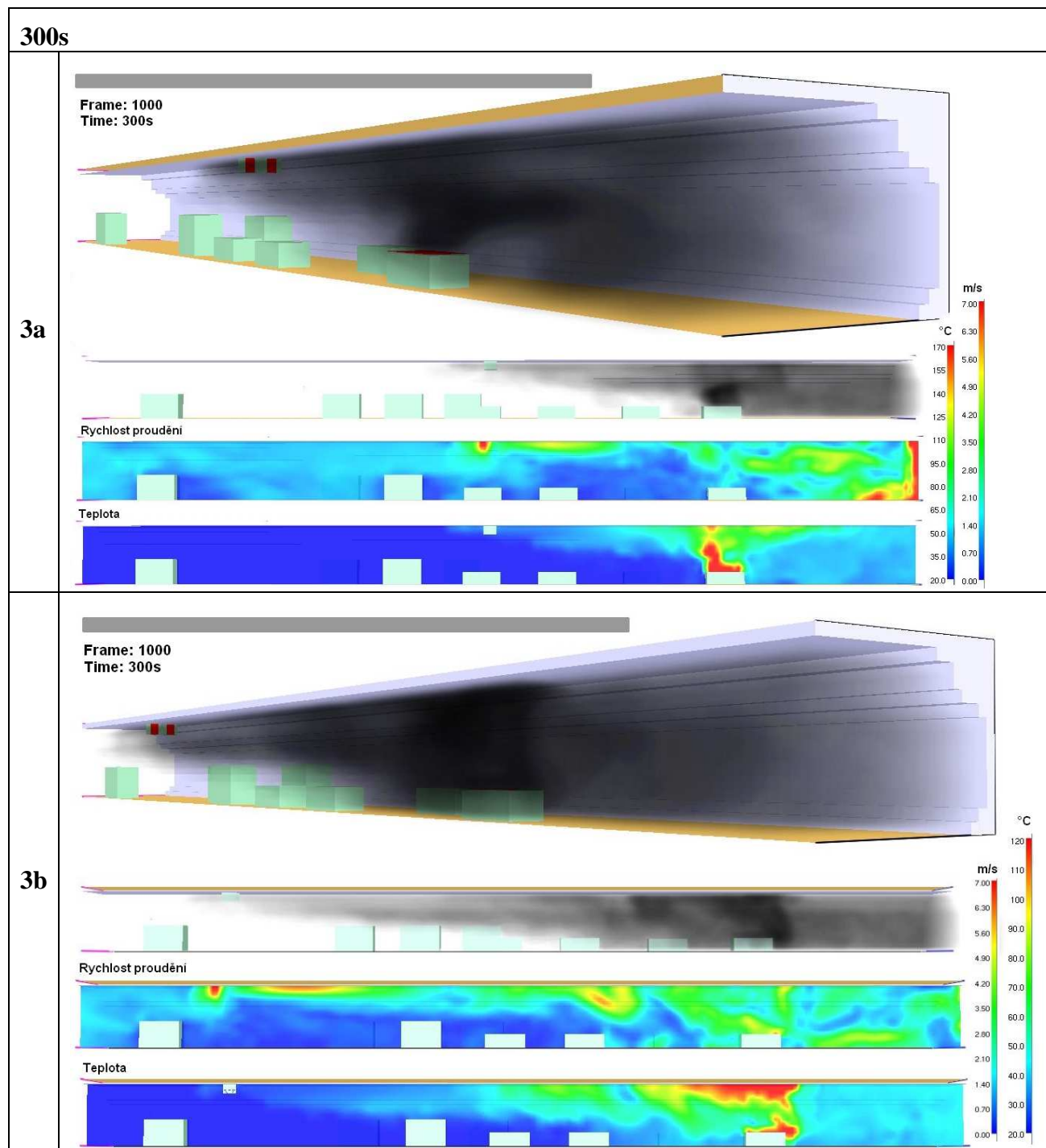
Tabulka 12: Parametry modelové situace 3

	Model č.3a			Model č.3b		
<i>Délka tunelu</i>	100 m					
<i>Rychlost proudění vzduchu na portále tunelu</i>	5,0 m.s <sup>-1</sup>					
<i>Požár 5MW</i>	X		Y		Z	
	[m]		[m]		[m]	
	4,65		20,25		0,00	
	6,35		24,75		1,50	
<i>Ventilátory</i>	X	Y	Z	X	Y	Z
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
	5,45	50,0	5,85	5,45	83,0	5,85
	8,05	51,5	6,95	8,05	84,5	6,95
<i>Rychlost proudění na výstupu</i>	- 25 m/s					

Na obr.15 je znázorněn průběh zakouření, rychlost proudění a teplota v 5. minutě požáru. Podrobnější průběh zakouření je uveden v příloze č.1.

Ze simulace vyplývá, že příznivější situací je ta, kdy je ohnisko požáru blíže k ventilátoru. Dochází k zakouření pouze části tunelu od ventilátoru směrem k portálu ve směru nuceného větrání. Auta stojící za hořícím vozidlem nejsou ohrožena kouřem. V případě druhém je situace stejná, ale vzhledem ke vzdálenosti ventilátoru od požáru jsou již kouřem ohrožena i ostatní vozidla.

Obrázek 15: Model 3 – 5. minuta požáru

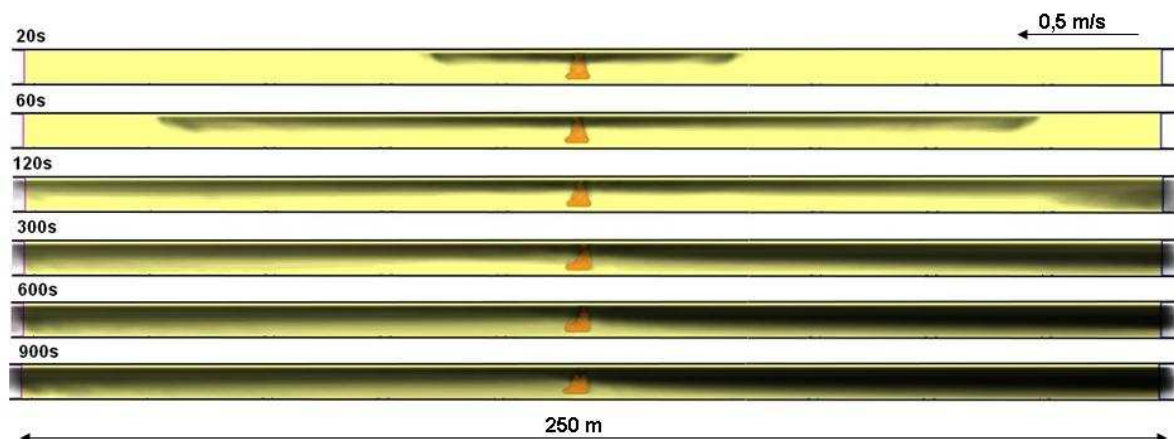


V prostoru celého tunelu byla měřena střední hodnota viditelnosti a teploty. Grafické znázornění průběhu obou sledovaných veličin je uveden v příloze č.1. Průměrná teplota je vyšší u modelu 3b z toho důvodu, že zakouření tunelu je větší, tím pádem je i větší objem prostoru zahříván zplodinami hoření. Viditelnost je naopak v případě 3b nižší, což je rovněž způsobeno větším zakouřením prostoru.

#### 5.4.4 Modelová situace 4

Tento model byl vytvořen pro přirozeně větraný tunel délky 250 m. Byl sledován průběh zakouření po dobu 900s bez použití nucené ventilace. Hořící vozidlo je umístěno v polovině délky tunelu, rychlost proudění na portále tunelu je 0,5 m/s. Na *obr.16* je znázorněn průběh zakouření.

Obrázek 16: Průběh zakouření přirozeně větraného tunelu



U přirozeného větrání tunelu se předpokládá, že se kouř vlivem vztakového efektu horkých plynů od požáru bude šířit směrem ke stropu tunelu, kde vytvoří souvislou vrstvu šířící se pod stropem tunelu na obě strany od požáru. Vlivem sdílení tepla s okolními stěnami tunelu a míšením s čerstvým vzduchem se vrstva horkého kouře ochlazuje a postupně klesá dolů k vozovce. Použití přirozené ventilace proto není vhodné pro tunely delší než 0,5 km při jednosměrném provozu a 0,3 km při obousměrném provozu.

V modelové situaci je vidět, že z počátku se kouř šíří oběma směry pod stropem tunelu, ale již ve druhé minutě, kdy dorazí k portálu tunelu, je šíření kouře ovlivněno rychlostí proudění, kouř se vrací zpět a dochází ke snížení kouřové vrstvy a tím zmenšení nezakouřeného prostoru. V 15. minutě požáru je již tunel téměř zcela zakouřen.

## 5.5 *Poznatky získané modelováním*

Modelování požáru je velmi perspektivní oblastí, která má řadu praktických uplatnění. Kombinace matematického modelování s reálnými zkouškami se jeví jako optimální postup vedoucí zejména k úspoře finančních prostředků. Například u požárních zkoušek v tunelu Valík, kde bylo matematické modelování využito k prognóze teplotního pole, vedly výsledky modelů k výraznému omezení použití izolace stavebních konstrukcí oproti původnímu návrhu. Hodnoty naměřené při následných reálných zkouškách předpoklady získané modelováním potvrdily. Predikce průběhu zkoušky vede k jejímu značnému zefektivnění.

Výsledky se mohou považovat za relevantní, jsou-li správně sestaveny parametry modelových situací. V aplikaci na modely sledující šíření kouře v tunelu můžou mít zásadní vliv následující faktory:

- ***Délka tunelu***

Je potřeba si uvědomit, že zvolená délka tunelu zásadně ovlivní průběh zakouření. Jedná se především o situaci, kdy se vrstva kouře při nízkých rychlostech proudění šíří proti jeho směru. Poté co vrstva dorazí k portálu tunelu, na kterém bude nastavena určitá hodnota rychlosti proudění, kouř se stočí do spodní části a vrací se zpět k ohnisku požáru, čímž dojde k postupnému zakouření i spodní vrstvy. Model, který sleduje šíření kouře jen v daném úseku tunelu, tedy nebude mít úplně stejný průběh jako v reálné situaci.

- ***Parametry ventilátorů***

Parametry ventilátorů jsou zejména jeho účinná plocha a výkon. V modelu to znamená obsah příčného průřezu a rychlost nastavená na jeho výstupu. Ve skutečnosti jsou ventilátory kruhového průřezu, v modelu se připodobní na čtverec podobného obsahu. Zvolená rychlost závisí na jevu, který má daný model sledovat. Při sledování průběhu zakouření v závislosti na umístění ventilátorů vzhledem k poloze ohniska požáru je lepší zvolit rychlost nižší. Dojde k většímu zakouření tunelu a rozdíl v daných příkladech je znatelnější. Naopak při simulaci odvětrání kouře při požáru je vhodné nastavit výkon ventilátoru na skutečnou hodnotu. 3D vizualizace pak ukazuje reálný průběh odvětrání a získané hodnoty měřených veličin mohou být považovány za směrodatné.

- ***Výkon požáru***

Výkon požáru, zadáný v programu v  $\text{kW/m}^2$ , je v poměru s množstvím kouře, které bude požár produkovat. Při tvorbě požárních scénářů je vhodné uvážit, že v tunelu může dojít jak k požáru osobního automobilu, tak nákladního vozidla převážejícího vysoce hořlavý materiál.

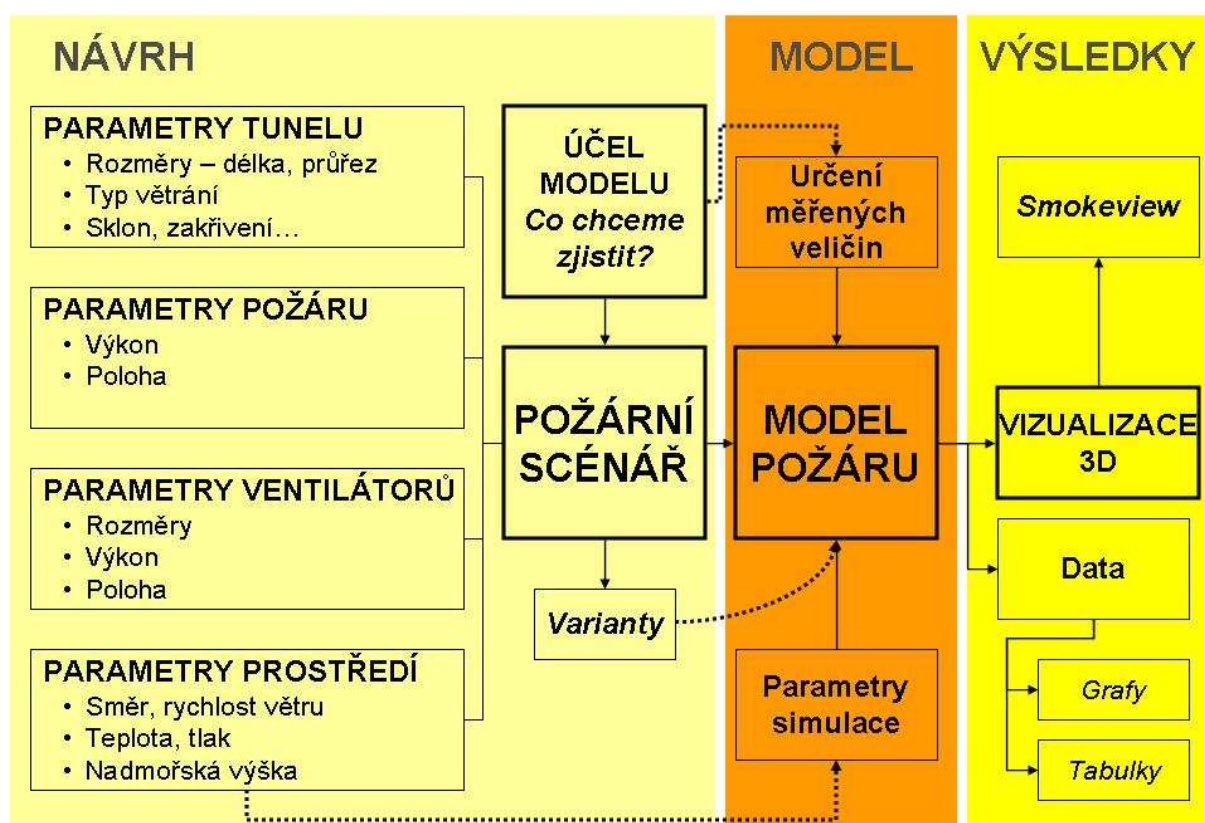


### ▪ *Parametry okolního prostředí*

Mezi parametry okolního prostředí patří zejména rychlost a směr větru, teplota okolí, tlak vzduchu a nadmořská výška. Rychlost a směr větru je v modelech vyjádřen rychlostí proudění vzduchu na portále tunelu a má význam hlavně při průběhu zakouření přirozeně větraných tunelů. Teplota okolí ovlivní průběh teplot v tunelu. Program *PyroSim 2010* umožňuje zadat tyto parametry v kartě „Parametry simulace“, kde je záložka pro vlastnosti okolního prostředí.

Na *Obr.17* je graficky znázorněna diplomantem navržená metodika postupu vytváření požárních modelů.

**Obrázek 17: Návrh postupu vytváření modelů požáru v tunelu**



Ze získaných poznatků z jednotlivých modelů vyplývá, že faktory, které v největší míře ovlivňují šíření kouře a jeho odvětrání, jsou především rychlost proudění na výstupu ventilátoru, poloha ohniska požáru vzhledem k rozmístění ventilátoru, délka tunelu a směr a rychlost přirozeného proudění vzduchu.

Práci by bylo možné rozšířit o sledování šíření kouře v tunelech složitější geometrie – zakřivení, stoupání, klesání, příp. kombinace těchto vlastností.



## 6 ZÁVĚR

Problematika silničních tunelů je dnes velmi diskutovaným tématem hlavně z hlediska požární bezpečnosti. Hlavním rizikem při požáru v tunelu je šířící se kouř a s ním spojené ohrožení zplodinami hoření a vzrůstající teplotou. Ohroženy jsou všechny osoby, které se v tunelu nacházejí. Správně zvolená a fungující ventilace rizika spojená s kouřem značně omezí. Dnes jsou na tunelové stavby kladeny vysoké bezpečnostní požadavky, které zahrnují i provádění požárních zkoušek, jejichž součástí je ověření funkčnosti ventilačního systému. Součástí požárních zkoušek může být simulace požáru pomocí matematického modelování sloužící k prognóze průběhu zkoušky.

Diplomová práce se zaměřila především na modelování šíření kouře v tunelu a měla poukázat na to, jaké faktory šíření kouře ovlivňují. Byla navržena vhodná metodika pro postup modelování a vytvořeny čtyři modelové situace, v nichž se měnily určité parametry. Proměnnými parametry byly typ větrání, délka tunelu, podmínky okolního prostředí, výkon ventilátorů a poloha ohniska požáru vzhledem k umístění ventilátorů. K modelování požáru byl jako nejvhodnější zvolen program *Fire Dynamics Simulator* a jeho uživatelská nástavba *PyroSim*. Program byl zvolen z důvodu jeho jednoduchosti pro uživatele bez předchozích zkušeností s modelováním požáru. Nevýhoda programu je časová náročnost jednotlivých výpočtů, což se může předpokládat i u jiných programů založených na výpočtové metodě CFD.

Ze získaných poznatků vyplynulo, že největší vliv na šíření kouře v tunelu bude mít výkon větracích zařízení, tzn. rychlost proudění vzduchu na výstupu ventilátorů. Bylo zjištěno, že nemalý vliv na zakouření tunelu má i poloha ohniska požáru vzhledem k umístění ventilátorů. V závěru práce diplomant zmínil i nedostatky, které modelování může mít. Jedná se především o volbu délky úseku tunelu, pro který je model počítán. Délka výrazně ovlivňuje čas zakouření celého prostoru zejména u modelování přirozeně větraných tunelů.

Matematické modelování je dnes velmi perspektivní oblastí, která má své uplatnění v celé řadě praktických aplikací. Přínosem diplomové práce je návrh metodiky vytváření modelů požáru v tunelu a rozbor faktorů, které tyto modely výrazně ovlivní. Dále je poukázáno na hlavní faktory, které mají vliv na šíření kouře při požáru v tunelu. Modelován byl pouze rovný tunel neměnné nadmořské výšky. Rozšířením práce by mohlo být modelování zakřivených tunelů překonávajících různé převýšení a také tunelů reálné délky a s požárem vyššího výkonu. Výsledky by měly uplatnění především při realizaci požárních zkoušek zejména v souvislosti s úsporou finančních prostředků.

## 7 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BEARD, Alan, CARVEL, Richard. *The handbook of tunnel fire safety*. 1st edition. London: Thomas Telford publishing, 2005. 514 s. ISBN 0 7277 3168 8.
- [2] BŘESKÁ, Pavla. *Šíření kouře v tunelu*. Ostrava, 2008. 35 s. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství.
- [3] HARTMAN, Piet; HUIJBEN, Hans. Tunnel ventilation and safety in escape routes. *Tunneling and underground space technology*. May-July 2006, Volume 21, Issues 3–4, s. 293–294. ISSN 0886–7798.
- [4] KOLEKTIV AUTORŮ. Požární zkoušky v silničním tunelu Valík. *I12 : Příloha*. roč. 2007, č. 5, 12 s.
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ. Zkoušky koordinace požárně bezpečnostních zařízení a systému ventilace v tunelu Klimkovice. *I12 : Příloha*. roč. 2008, č. 12, 12 s.
- [6] KOLEKTIV AUTORŮ. Zpráva o výsledcích měření při požárních zkouškách v tunelu Valík dne 25. 5. 2006. *MVČR, GŘ HZS, TÚPO*, 2008, 69 s.
- [7] KREPELKA, F., ZÁHORANSKÝ, G. a kol. *Tunely*. 1. vydání. Košice: AMS, F BERG, TU, 2006. 396 s. ISBN 80–8073-591–3.
- [8] KUČERA, P., KAISER, R. *Úvod do požárního inženýrství*. 1. vydání. Ostrava: SPBI, 2007. 174 s. ISBN 978–80-7385–024-1.
- [9] LANDA, Jiří; HOFHANSL, Petr; LÁVIC, Jiří. Studie bezpečnosti tunelů pozemních komunikací a analýza rizik. *Silnice Železnice* [online]. 26. 6. 2009, 2009, 2, [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/studie-bezpecnosti-tunelu-pozemnich-komunikaci-a-analyza-rizik/>>. ISSN 1803–8441.
- [10] MODIC, Jurij. Fire simulation in road tunnels. *Tunneling and underground space technology*. November 2003, Volume 18, Issue 5, s. 525–530. Dostupný také z WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>. ISSN 0886–7798.
- [11] MV ČR, GŘ HZS. *Bojový řád jednotek požární ochrany: Metodický list č. S 8: Zásah v silničním tunelu*. Praha : [s.n.], 2006. 5 s.
- [12] PLEVA, Lukáš. *Proudění vzduchu v tunelu*. Ostrava, 2008. 44 s. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta bezpečnostního inženýrství.
- [13] POŘÍZEK, Jan. Požární zkouška v tunelu Mrázovka. *Tunel*. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 40–44. Dostupný z WWW: <<http://www.ita-aites.cz/showdoc.do?docid=1655>>.

- [14] PŘIBYL, P., KOŠTÁL, M. Metodika zkoušení požáru v tunelech pozemních komunikací. *Tunel*. 2008, roč. 2008, č. 1, s. 29-32. Dostupný z WWW: <<http://www.ita-aites.cz/showdoc.do?docid=1655>>.
- [15] PŘIBYL, Pavel. *Technologické vybavení tunelů pozemních komunikací: Technické podmínky*. 2. upr. vyd. [s.l.] : MD - OPK, c2003. 140 s. ISBN 80-239-0110-9.
- [16] STACH, J., SVATUŠKA, M. Geologie tunelu Klimkovice a monitoring připortálových oblastí. *Tunel*. 2008, roč. 2008, č. 4, s. 21–27. Dostupný z WWW: <[http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel\\_4\\_08.pdf](http://www.ita-aites.cz/files/tunel/komplet/tunel_4_08.pdf)>.
- [17] ZÁPAŘKA, Jiří. Bezpečnost při požáru v tunelu. *Stavebnictví*, roč. 2009, č. 5, s. 46-53. Dostupný z WWW: <<http://www.casopisstavebnictvi.cz/clanek.php?detail=2345>>

#### **Internetové zdroje:**

- [18] *FIT: Fires in tunnels* [online]. Monday, October 29,2007 [cit. 2010-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.etnfit.net/>>
- [19] *Ředitelství silnic a dálnic ČR* [online]. 23. dubna 2009 [cit. 2010-03-07]. Tunelová problematika u ŘSD. Dostupné z WWW: <http://www.rsd.cz/Silnicni-a-dalnicni-sit/Tunely>.
- [20] *PyroSim* [online]. c2009 [cit. 2010-04-08]. PyroSim documentation. Dostupné z WWW: <<http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/documentation.html>>.
- [21] *Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava : Fakulta bezpečnostního inženýrství* [online]. 2004 [cit. 2010-03-08]. Modely požárů. Dostupné z WWW: <<http://modelovani.fbi.vsb.cz/>>.

## **SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Dělení tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení

Obrázek 2: Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (lineární měřítko)

Obrázek 3: Kategorizace tunelů z hlediska bezpečnostního vybavení (logaritmické měřítko)

Obrázek 4: Přirozená ventilace

Obrázek 5: Podélná ventilace

Obrázek 6: Polopříčná ventilace

Obrázek 7: Příčná ventilace

Obrázek 8: Schéma požární zkoušky v tunelu Mrázovka s 3D modelem svodného požárního vzduchovodu v raženém úseku

Obrázek 9: Mobilní tunelový ventilátor

Obrázek 10: Dělení modelů požáru v uzavřeném prostoru

Obrázek 11: Tunel Klimkovice – rozměry tubusu A

Obrázek 12: Příčný průřez modelu tunelu

Obrázek 13: Model 1 – 15. minuta požáru

Obrázek 14: Model 2 – 15. minuta požáru

Obrázek 15: Model 3 – 5. minuta požáru

Obrázek 16: Průběh zakouření přirozeně větraného tunelu

Obrázek 17: Návrh postupu vytváření modelů požáru v tunelu

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Bezpečnostní kategorie pro tunely s intenzitou dopravy menší než 1000 voz/den

Tabulka 2: Kategorizace tunelů pro intenzitu nižší než 1000 voz/den

Tabulka 3: Kategorizace tunelů pro intenzitu dopravy vyšší než 15000 voz/den

Tabulka 4: Rozsah použití ventilačních systémů

Tabulka 5: Přehled významných požárních zkoušek v tunelech ve světě

Tabulka 6: Popis jednotlivých zkoušek

Tabulka 7: Materiály a jejich vlastnosti

Tabulka 8: Parametry modelových situací

Tabulka 9: Parametry okolního prostředí

Tabulka 10: Parametry modelové situace 1

Tabulka 11: Parametry modelové situace 2

Tabulka 12: Parametry modelové situace 3

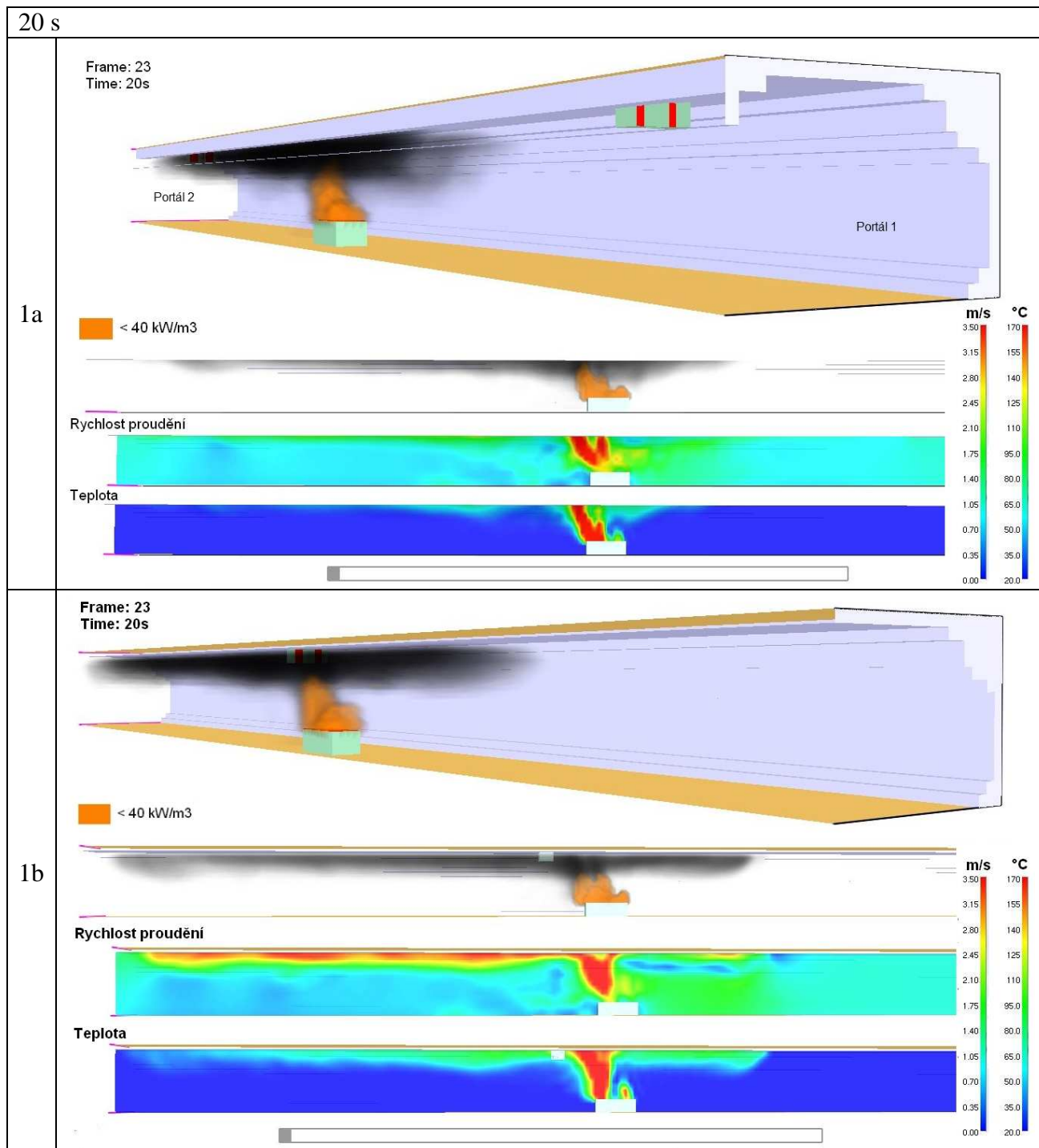
## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1: Grafické zpracování výsledků modelování

## Příloha 1: GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MODELOVÁNÍ

### 1 MODELOVÁ SITUACE 1

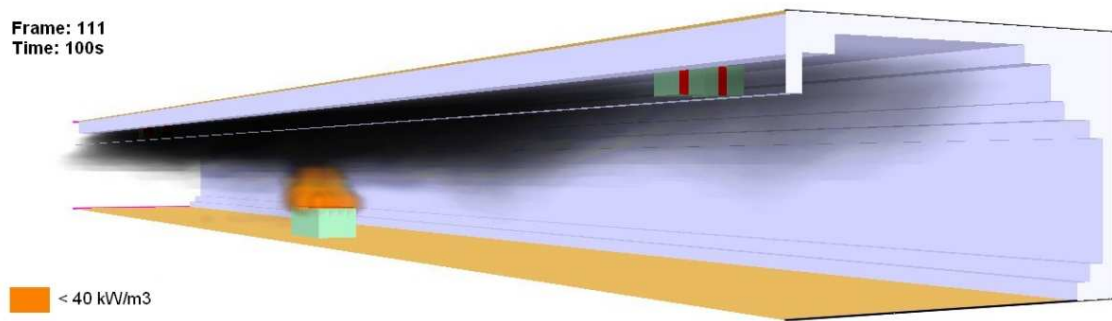
Průběh zakouření:



100 s

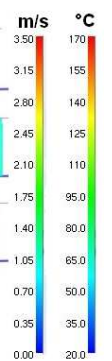
1a

Frame: 111  
Time: 100s



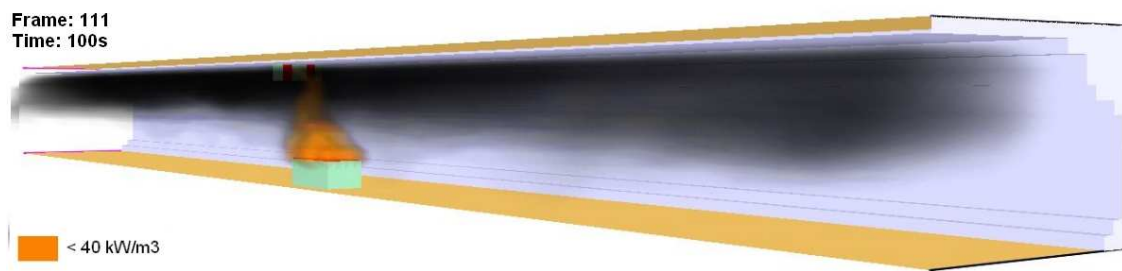
Rychlost proudění

Teplota



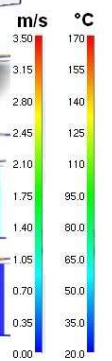
1b

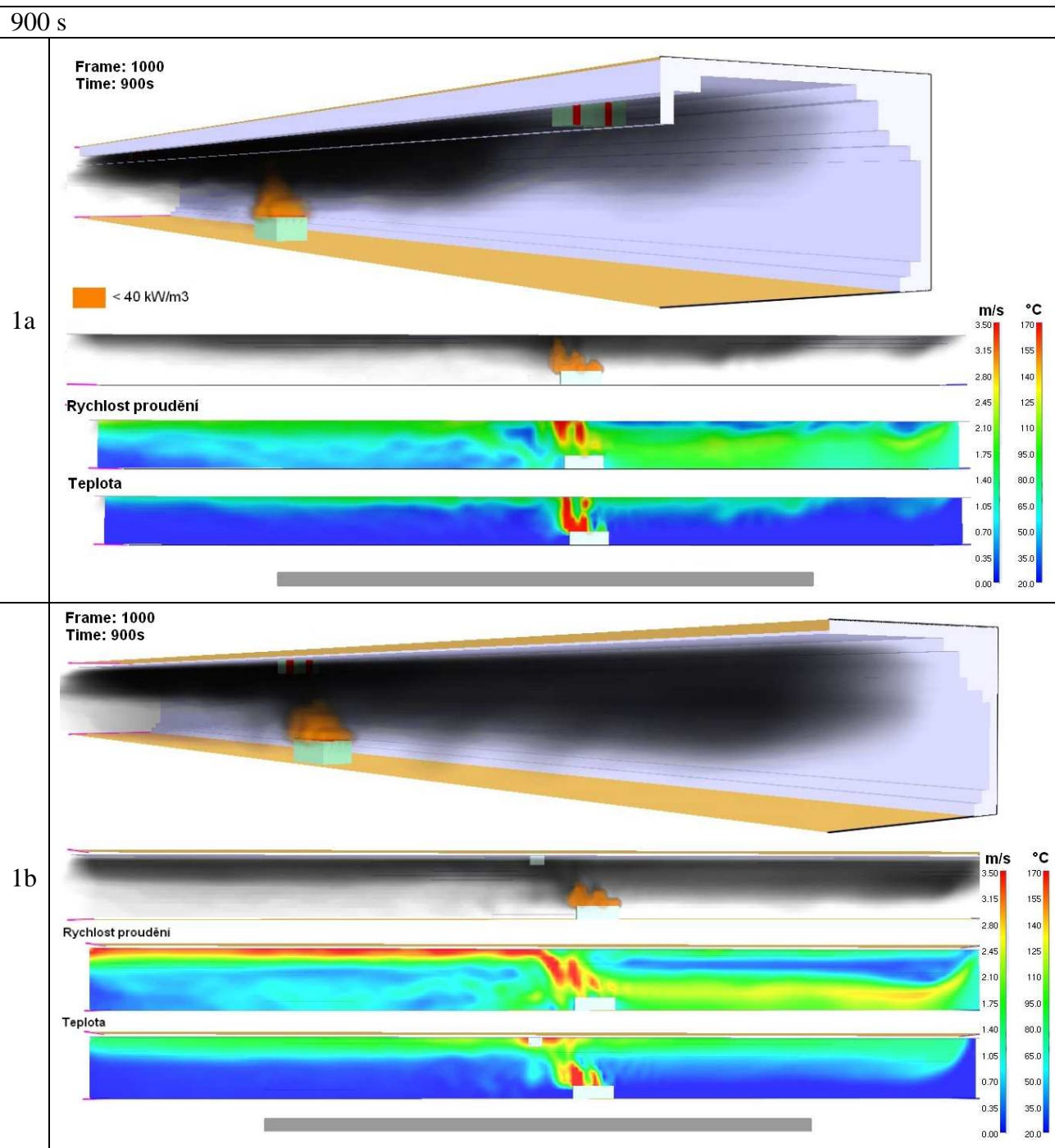
Frame: 111  
Time: 100s



Rychlost proudění

Teplota

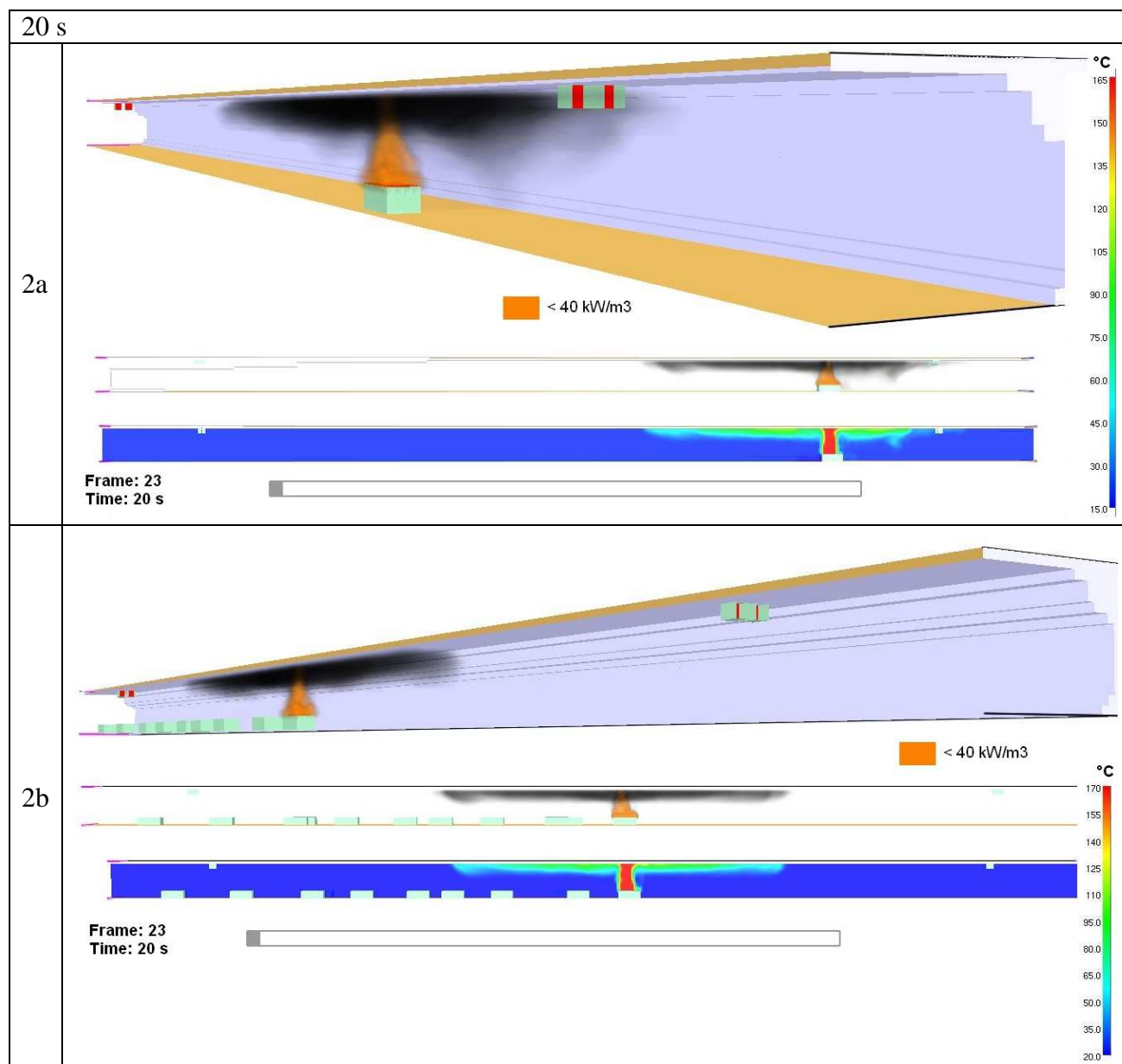


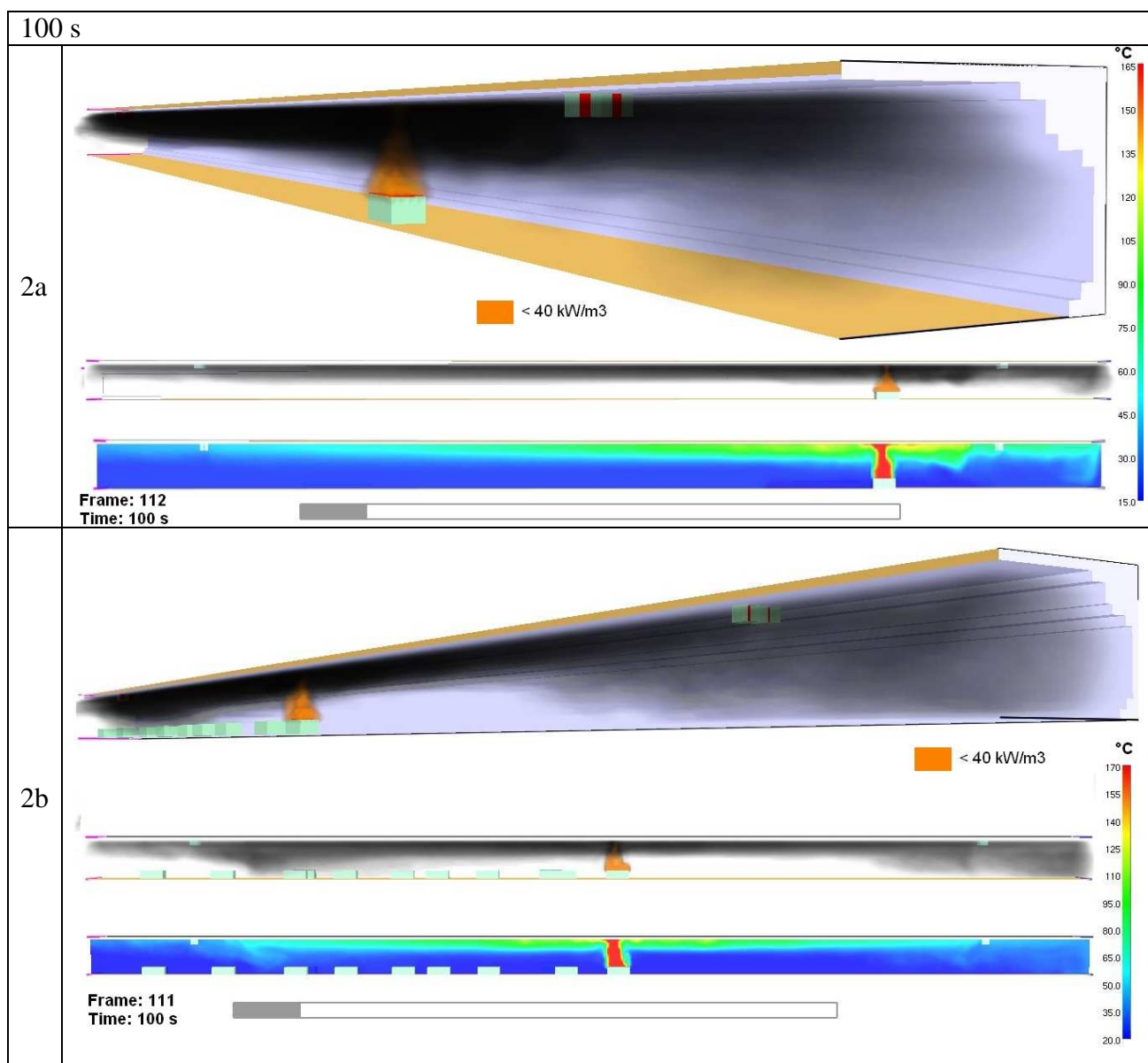


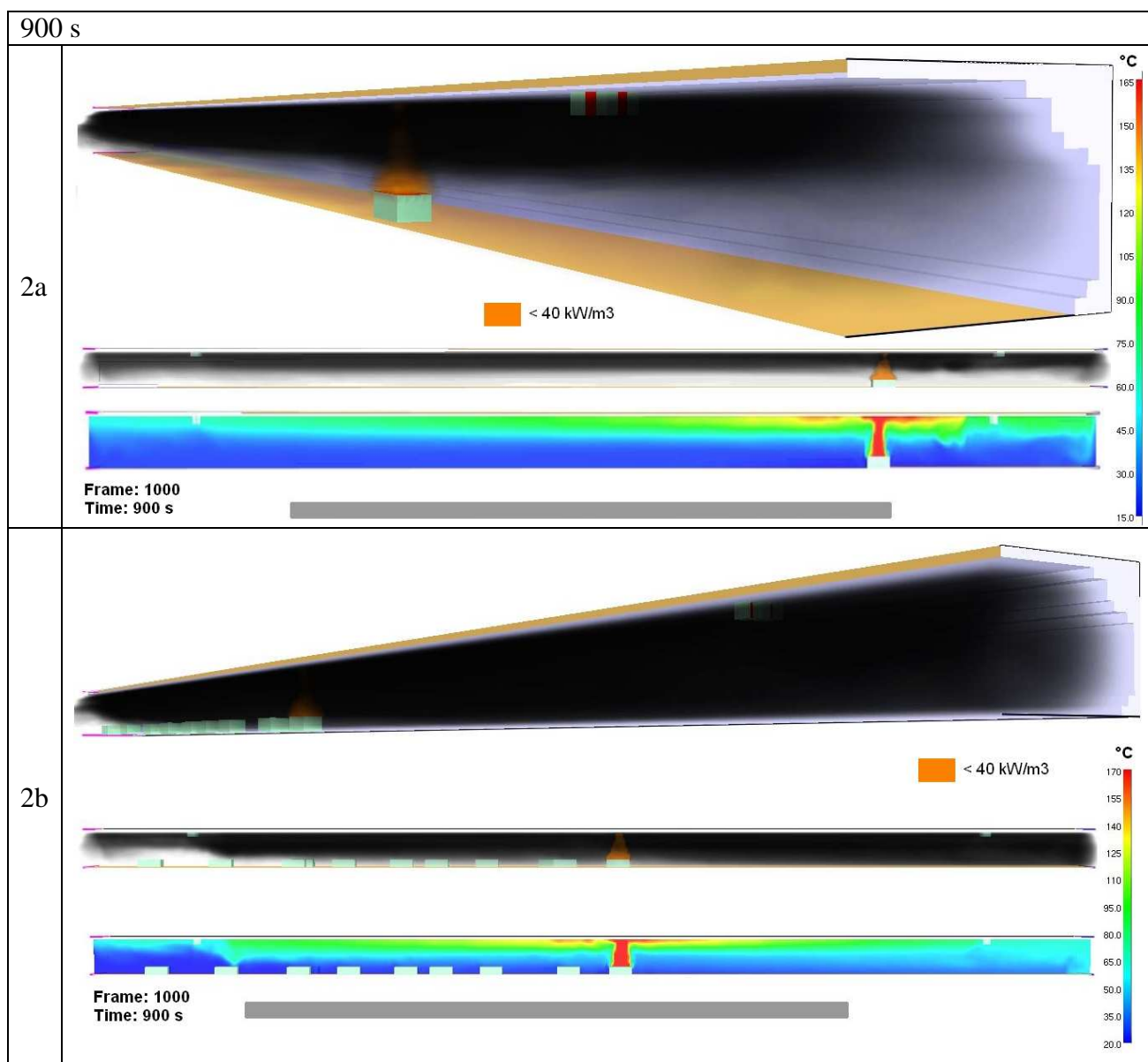


## 2 Modelová situace 2

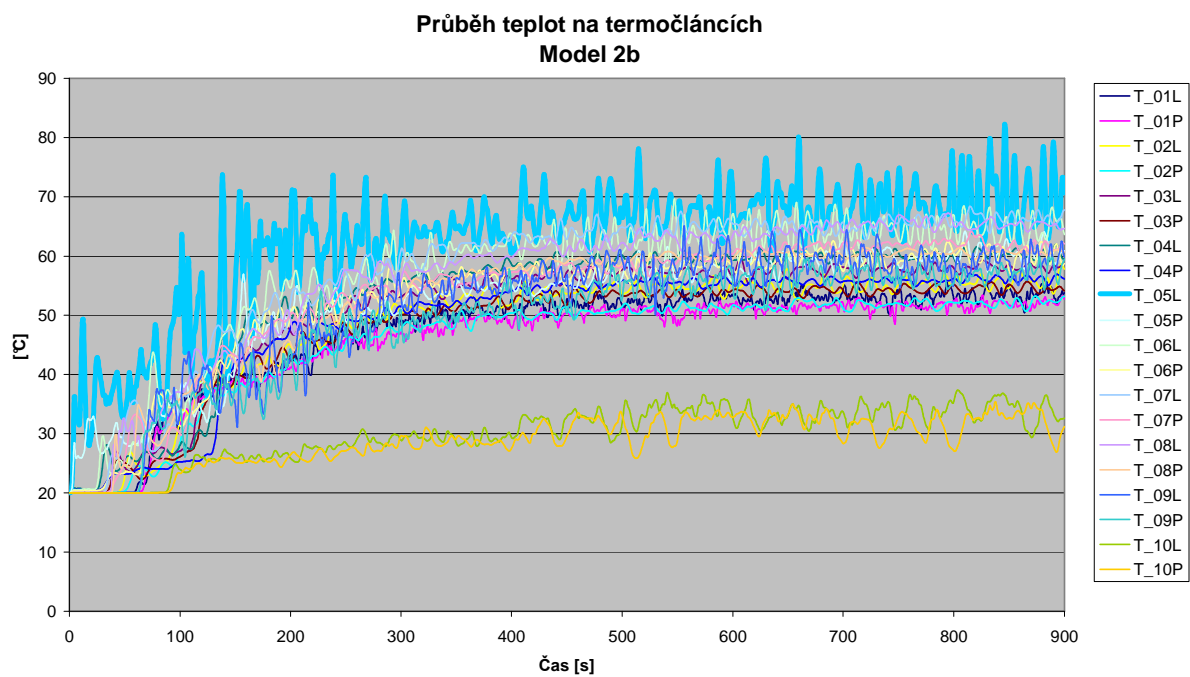
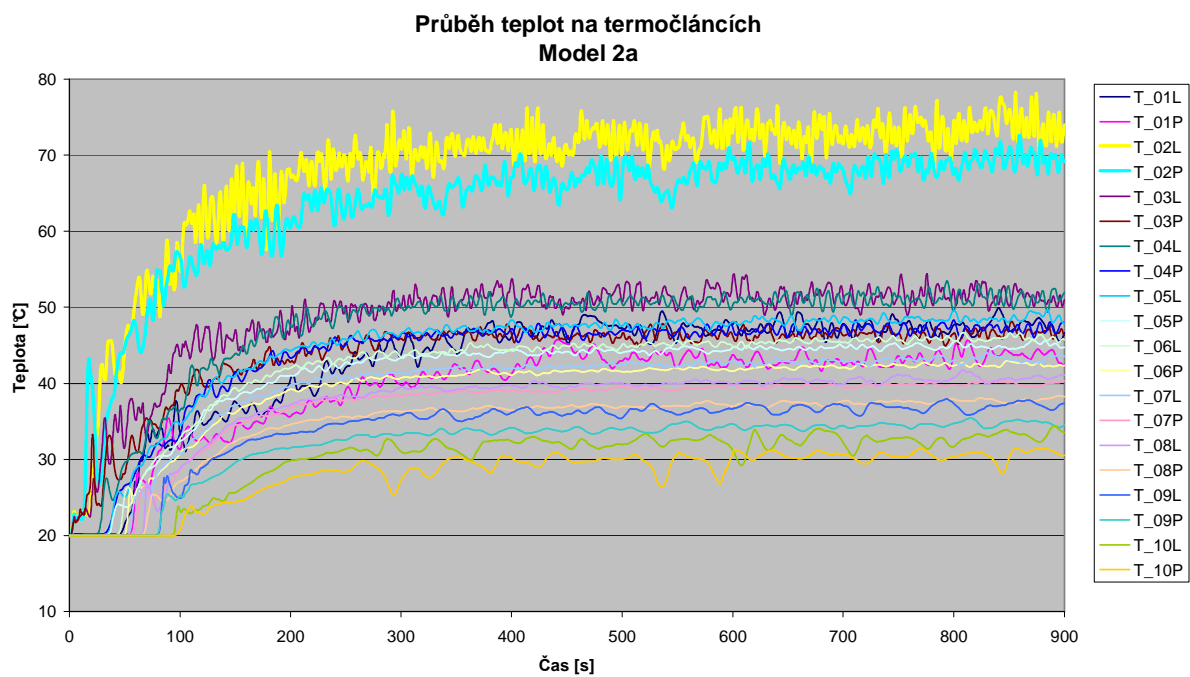
Průběh zakouření:







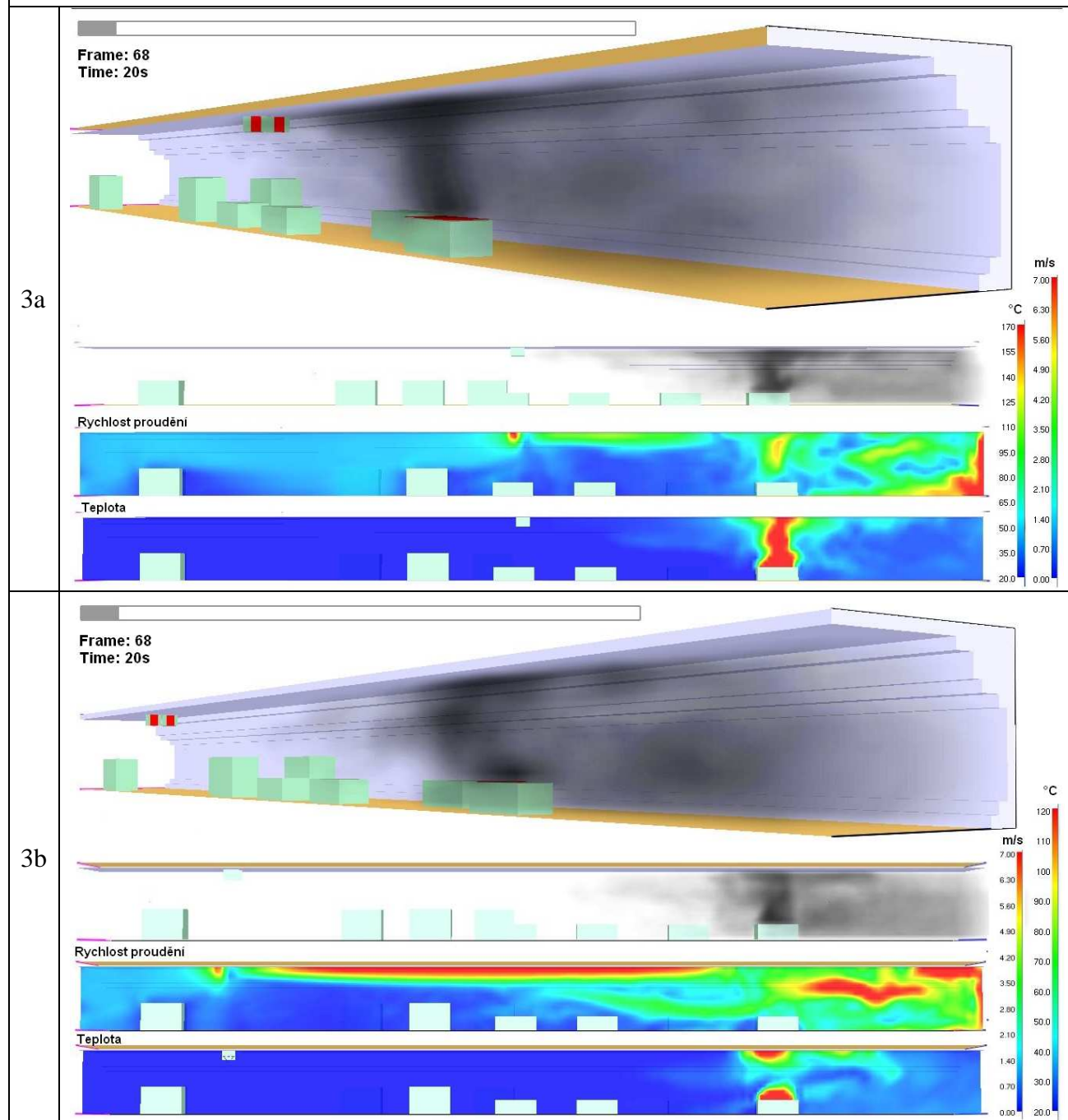
Grafy průběhu teplot naměřených na termočláncích:



### 3 Modelová situace 3

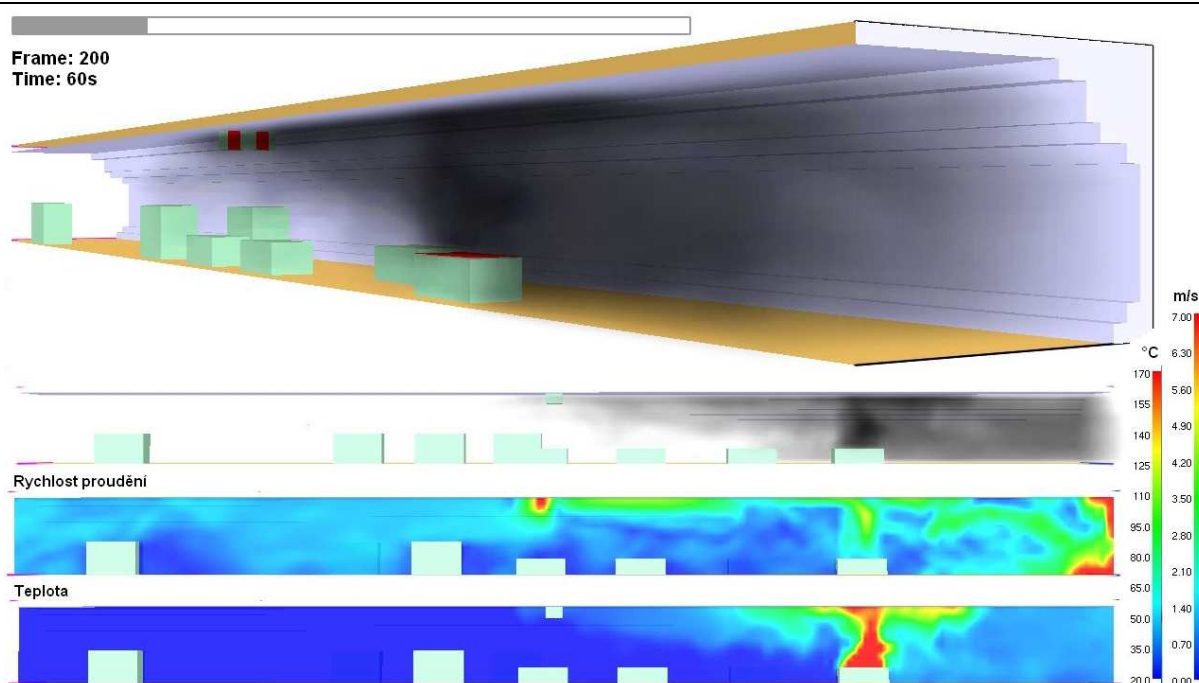
Průběh zakouření:

20 s

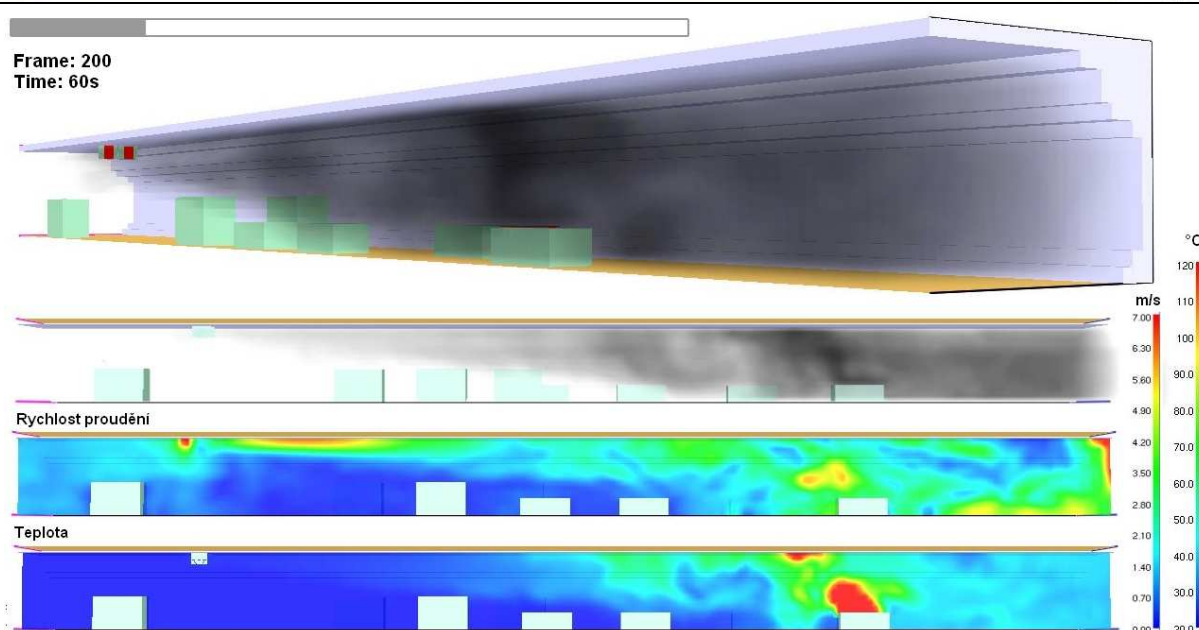


60 s

3a



3b

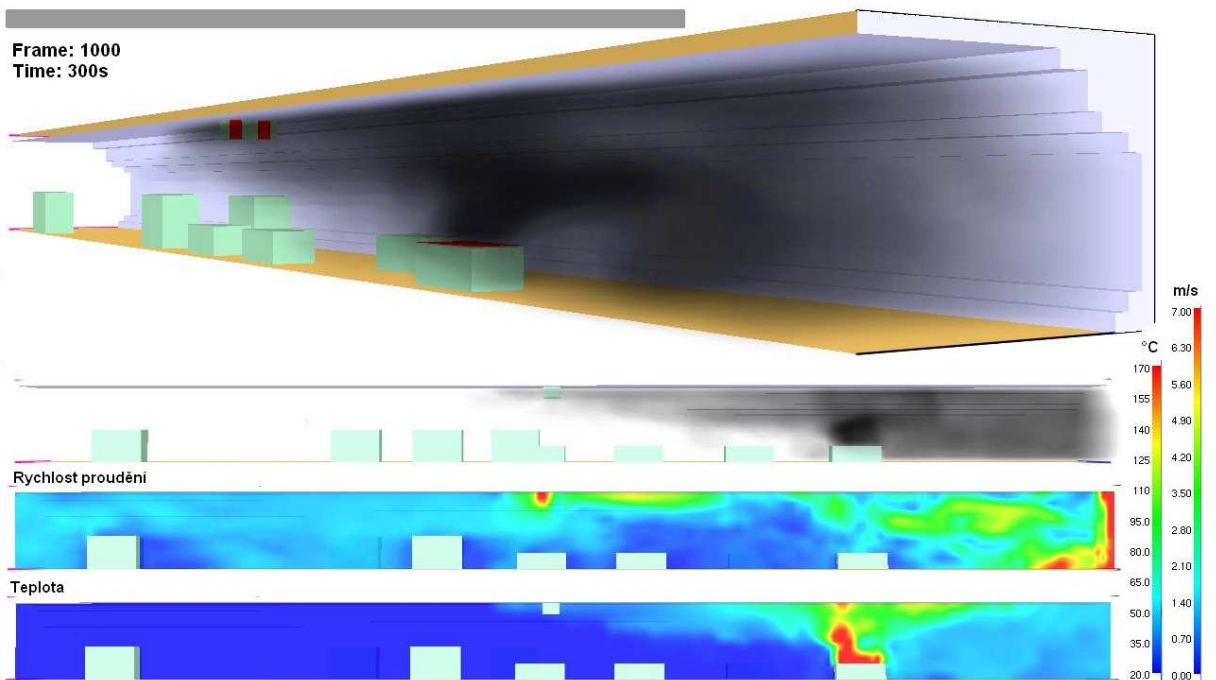




300 s

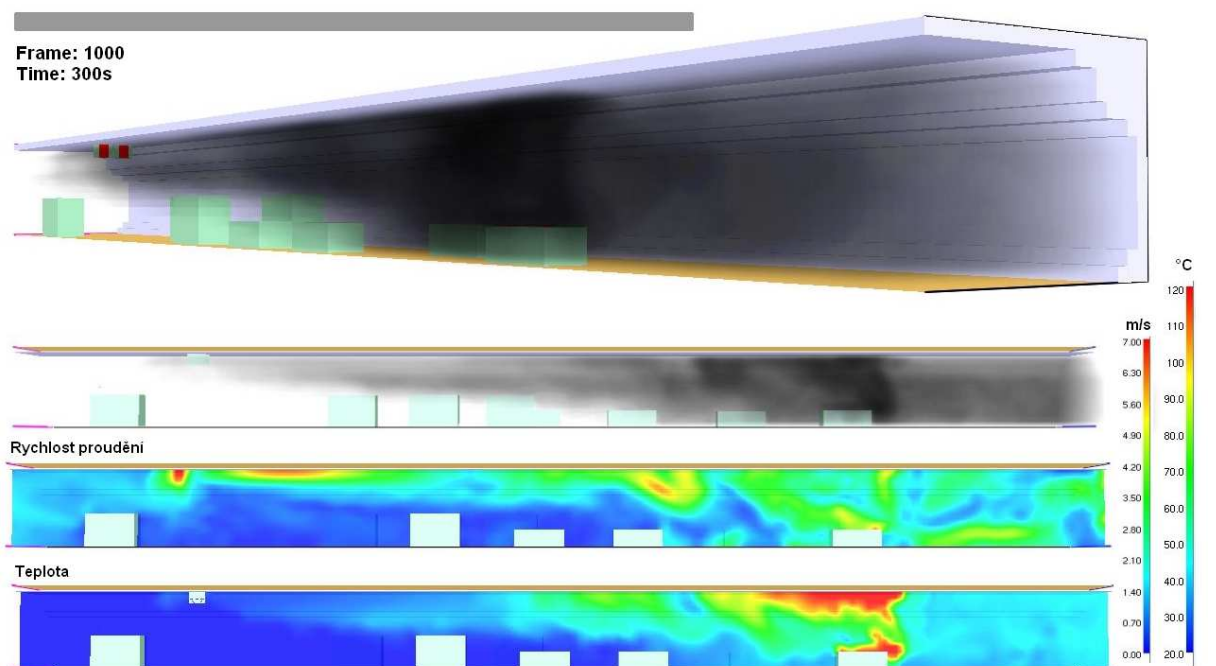
3a

Frame: 1000  
Time: 300s

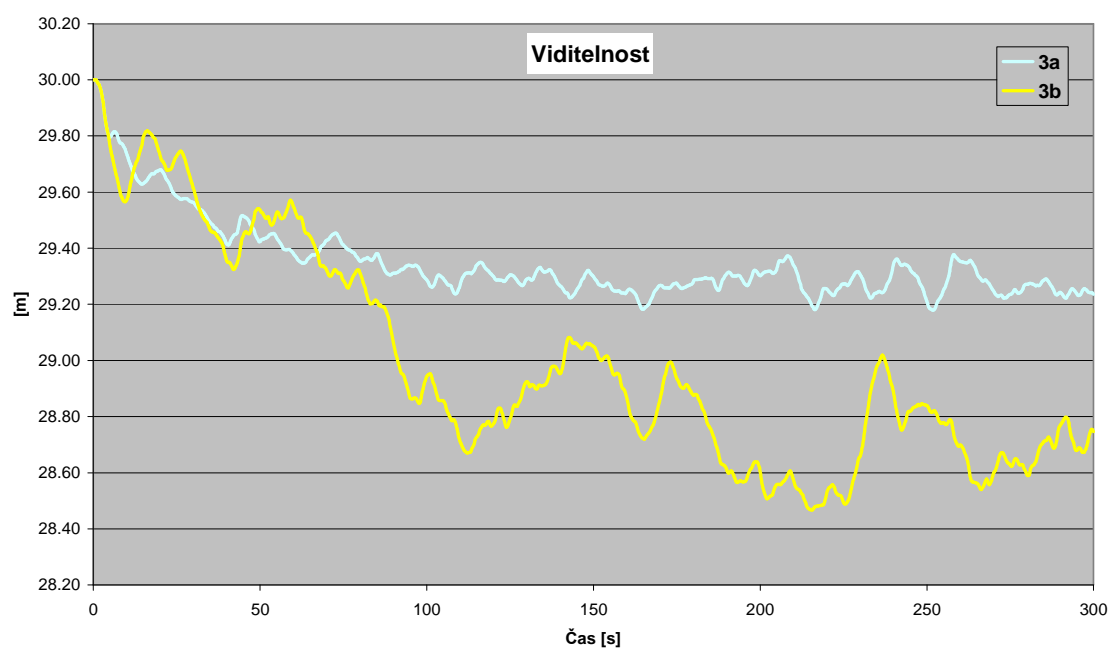
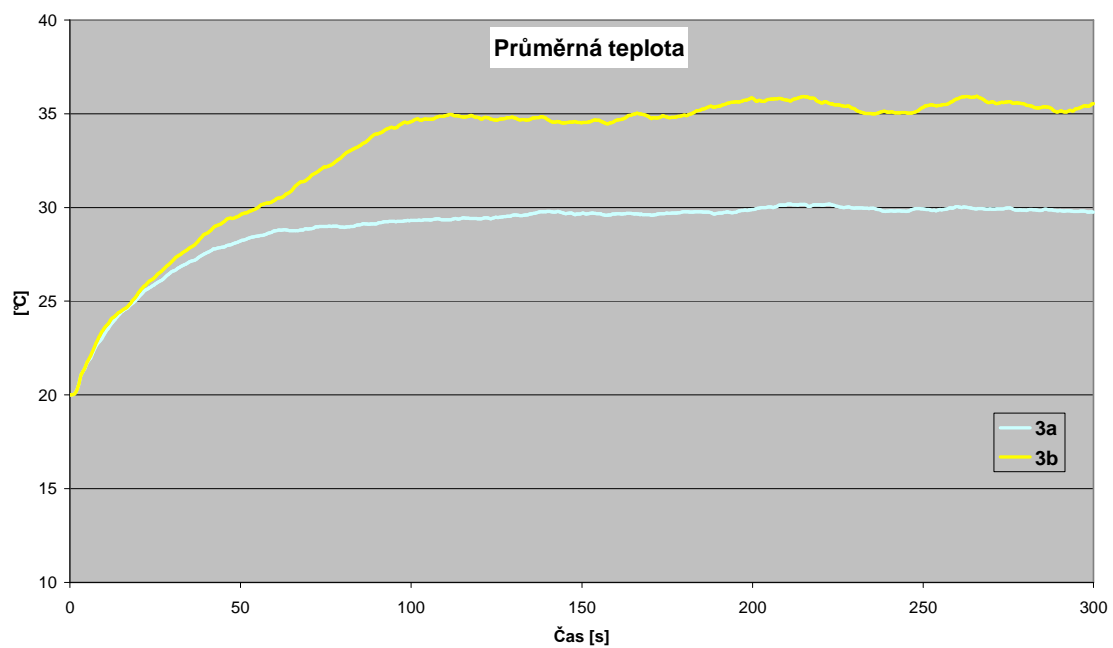


3b

Frame: 1000  
Time: 300s

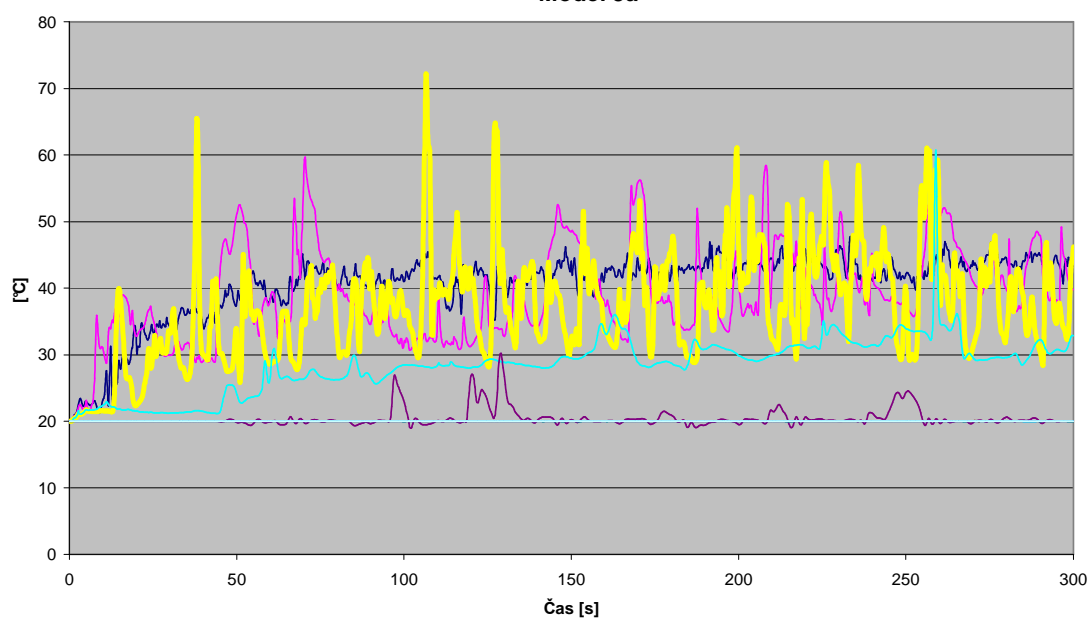


Grafy průběhu měřených hodnot:





Průběh teplot na termočláncích  
Model 3a



Průběh teplot na termočláncích  
Model 3b

